

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MÔNICA ÁBIDO BATISTA CHAVES DA SILVA

ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO

CURITIBA

2016

MÔNICA ÁBIDO BATISTA CHAVES DA SILVA

ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof. Elizete Maria Lourenço.

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGE
Setor de Tecnologia

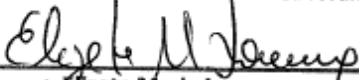
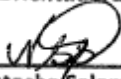
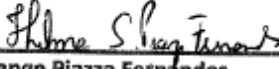
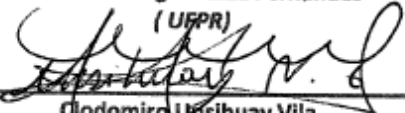
ATA DE DEFESA DE Mestrado

Ao primeiro dia do mês de julho de 2016, nas dependências do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR, foi instalada a centésima nonagésima quinta Banca Examinadora da Dissertação de Mestrado da discente **MÔNICA ÁBIDO BATISTA CHAVES DA SILVA**, na Área de Concentração em **SISTEMAS DE ENERGIA** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPR.

A Banca Examinadora, aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, ficou constituída pelos professores doutores Elizete Maria Lourenço, Nastasha Salame da Silva, Clodomiro Unsihuay Vila e Thelma Solange Piazza Fernandes.

Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata a fazer a apresentação de seu trabalho de Mestrado intitulado "**ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO**". Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição do candidato pelos membros da banca. Em separado e com base na dissertação escrita e na arguição do candidato, a banca deliberou sobre o trabalho de Mestrado do candidato.

Os votos dos membros da banca foram:

| | |
|---|---|
|  Elizete Maria Lourenço (Orientadora, UFPR) | Aprovado <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado Condicionalmente <input type="checkbox"/> Não Aprovado <input type="checkbox"/> |
|  Nastasha Salame da Silva (UFPR) | Aprovado <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado Condicionalmente <input type="checkbox"/> Não Aprovado <input type="checkbox"/> |
|  Thelma Solange Piazza Fernandes (UFPR) | Aprovado <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado Condicionalmente <input type="checkbox"/> Não Aprovado <input type="checkbox"/> |
|  Clodomiro Unsihuay Vila (UFPR) | Aprovado <input checked="" type="checkbox"/> Aprovado Condicionalmente <input type="checkbox"/> Não Aprovado <input type="checkbox"/> |

Tendo em vista as posições individuais de seus membros, a banca decidiu que o candidato está:

APROVADO.

APROVADO Condicionalmente. Ver observações no verso.

NÃO APROVADO.

Neste ato, atestamos que os requisitos necessários para a obtenção do título de mestre, conforme artigo 61 do regimento do PPGE, foram todos cumpridos e que a versão final da dissertação foi aprovada pelo orientador acadêmico do aluno. No caso de aprovação condicional, atesto que a banca também aprovou a versão final da dissertação.



Coordenador do PPGE

Curitiba, 01 de julho de 2016.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que diante de todas as dificuldades, guiou os meus passos, me deu forças para prosseguir e colocou pessoas maravilhosas em meu caminho, para que eu conseguisse concluir este trabalho.

A querida orientadora professora Elizete Maria Lourenço, por depositar sua confiança em mim e por seus inestimáveis ensinamentos.

A minha colega doutoranda Ellen Mara Medeiros Nogueira, que me auxiliou de todas as formas possíveis neste trabalho, sempre prestativa e amável.

Aos meus pais Jorge Loss Chaves e Sandra Regina A. B. Chaves, que sempre me incentivaram a estudar e a aprofundar meus conhecimentos, e que muito me ajudaram durante a realização deste trabalho.

Ao meu esposo Rodrigo da Silva, que mesmo com seu tempo limitado, cuidou de nossa filha Lívia durante o período em que me dediquei ao mestrado.

Aos professores Thelma Solange Piazza Fernandes e Clodomiro Unsihuay Vila pelas importantes contribuições no processo de qualificação e conclusão do trabalho.

A COPEL que permitiu a realização do curso de mestrado e aos meus colegas de trabalho, que me incentivaram.

RESUMO

A estimação de estados generalizada permite a modelagem da rede no nível de subestação, possibilitando o aproveitamento de medidas e informações contidas no interior das subestações. Além disso, esse nível detalhado de representação da rede traz consigo a possibilidade de avanços na detecção de erros de *status* de disjuntores em subestações do sistema elétrico supervisionado pelo Sistema de Supervisão e Controle de Dados dos centros de operação. Porém, na estimação de estados generalizada, são acrescentadas ao problema novas variáveis de estado, bem como pseudomedidas. Este incremento de variáveis implica em um maior esforço computacional, bem como aumento no tempo de processamento necessário para a solução do algoritmo do estimador. Buscando uma melhor performance na solução deste problema, é proposta neste trabalho a utilização do método desacoplado rápido para a formulação da estimação dos estados generalizada, já que comprovadamente, o estimador de estados convencional desacoplado apresenta maior rapidez para a solução do problema, sem alterações significativas no resultado final. O estimador proposto foi aplicado nos sistemas teste IEEE 24 e 30 barras, sendo adotadas duas configurações diferentes de *status* de disjuntores para o sistema teste IEEE 30 barras. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade e eficiência da aplicação das técnicas de desacoplamento ao problema de estimação de estados generalizada, e comprovam a redução do tempo de solução do problema, conforme proposto nesse trabalho.

Palavras-Chave: Estimação de Estados, Método Desacoplado Rápido, Estimação de Estados Generalizada.

ABSTRACT

The Generalized State Estimation brought the possibility of error detection in circuit breakers status errors in the electrical system substations supervised by the supervisory control system of operation centers. However, in this case, are added new state variables and pseudomeasurements to the estimation problem. This increase of variables provides a higher computational effort and increase the solution time of the estimation algorithm. Seeking a better performance to solving this problem, this work propose using the fast decoupled method to obtain the estimation results, as proven, the conventional fast decoupled state estimator is faster to solve the problem without significant changes in the final result. The proposed estimator was applied to the IEEE 24 and 30 bars test systems, and was adopted two different configurations of circuit breakers status for the IEEE 30 bars test system. This study aims to show the feasibility of implementing the fast decoupled generalized state estimator and verify the reduction of the solving time estimation problem, considering the inclusion of new states variables.

Keywords: State Estimation, Fast Decoupled Method, Generalized State Estimation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO. | 44 |
| FIGURA 2 – SISTEMA TESTE SIMBÓLICO..... | 46 |
| FIGURA 3 – SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS..... | 48 |
| FIGURA 4 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 14 E 16 DO SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS..... | 49 |
| FIGURA 5 – SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS..... | 52 |
| FIGURA 6 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 12 E 15 DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS – CASO 1..... | 53 |
| FIGURA 7 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 12 E 15 DO SISTEMA TESTE 30 BARRAS – CASO 2..... | 56 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 OBJETIVOS | 10 |
| 1.1.1 OBJETIVO GERAL | 10 |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO | 11 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 12 |
| 2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA | 13 |
| 2.1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2.2 ESTIMADOR DE ESTADOS | 14 |
| 2.3 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO | 17 |
| 2.3.1 MODELAGEM DE RAMOS CHAVEÁVEIS | 17 |
| 2.3.2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO RESTRITO | 19 |
| 2.4 METODO DE TABLEAU ESPARSO | 21 |
| 2.5 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM DOIS ESTÁGIOS | 23 |
| 2.6 PROCESSAMENTO DE ERROS DE TOPOLOGIA | 24 |
| 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 25 |
| 3 ESTIMADORES DE ESTADOS DESACOPLADOS | 27 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 27 |
| 3.2 ESTIMADOR DE ESTADOS DESACOPLADO COMUM | 27 |
| 3.3 ESTIMADOR DE ESTADOS DESACOPLADO RÁPIDO | 31 |
| 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 34 |
| 4 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO | 35 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 35 |
| 4.2 ESTIMADOR DE ESTADOS PELO MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO | 36 |
| 4.3 DESACOPLAMENTO NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA | 39 |
| 4.4 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA | 44 |
| 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO | 45 |
| 5 RESULTADOS | 46 |
| 5.1 INTRODUÇÃO | 46 |
| 5.2 SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS: EXEMPLO SIMBÓLICO | 46 |
| 5.3 SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 5.4 SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS _____ | 52 |
| 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO _____ | 59 |
| 6 CONCLUSÕES _____ | 61 |
| 6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS _____ | 61 |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____ | 61 |
| REFERÊNCIAS _____ | 63 |

1 INTRODUÇÃO

A estimação de estados foi proposta inicialmente em 1970 a partir da publicação de três artigos intitulados *Power System Static-State Estimation*, partes I, II e III. A estimação de estados processa um conjunto de medidas e, a partir da relação matemática entre os estados do sistema (tensão complexa em todas as barras) e as medidas disponíveis, gera um fluxo de carga em tempo real (SCHWEPPE; WILDES; ROM, 1970).

A modelagem para estimação de estados utilizada até o final da década de 80 era apenas a do tipo barra-ramo, porém, visando aproveitar as medidas e informações internas das subestações e obter informações de *status* de dispositivos de manobras, Monticelli; Garcia (1991) desenvolveram uma modelagem de ramos com impedância nula e no final da década de 90, foi apresentada a estimação de estados generalizada (ALSAÇ *et al.*, 1998).

A estimação de estados generalizada ou estimação de estados no nível de subestação ou ainda, no nível de seção de barras, possibilitou o desenvolvimento de algoritmos eficientes para processamento de erros de topologia, uma vez que a modelagem de dispositivos de manobra (chaves e disjuntores) facilita a análise deste tipo de erro. Entretanto, na estimação de estados generalizada, a dimensão do problema aumenta com a adição de novas variáveis de estado e pseudomedidas. A modelagem detalhada da rede, conforme proposto, implicou também na revisão da análise da observabilidade do sistema, que passa a compreender também as tensões das seções de barra e os fluxos nos dispositivos de manobra (MONTICELLI, 1999).

Assim, a modelagem no nível de seção de barras tem como desvantagem o aumento do custo computacional do processo de estimação de estados. Essa desvantagem é ainda mais significativa quando se observa a característica de aplicação para operação em tempo real do estimador de estados. Sendo assim, é de extrema importância que seu algoritmo seja eficiente e com rápido processamento. A preocupação com o custo de processamento vem sendo alvo de estudos desde a proposição da estimação de estados por Schweppe.

Rossier, Horisberger e Richard (1976) propuseram o desacoplamento do problema de estimação de estados principal em dois subproblemas lineares

denominados de $P\Theta$ e QV , resolvidos pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados para sistemas elétricos de grande escala, com a iteração alternada das equações (P e Q) e considerando submatrizes fixas e simplificadas da matriz ganho.

Abreu, Garcia e Monticelli (1979) mostraram que o desacoplamento ativo/reactivo no estimador de estados desacoplado rápido tinha as mesmas vantagens computacionais do cálculo do fluxo de carga. Porém esse artigo diz respeito à performance dos estimadores desacoplados no algoritmo e no modelo, sendo enfatizado o processamento de dados errôneos.

É de extrema importância que na aplicação comercial, o estimador de estados possua um tempo de solução compatível com a sua utilização em tempo real nos centros de operação do sistema elétrico, principalmente durante a ocorrência de contingências. Tendo em vista o aumento de variáveis no estimador generalizado, é necessário que este detenha um algoritmo eficaz para a solução do problema em tempo adequado para a operação em tempo real.

Desta forma, este trabalho consiste em estender a formulação do estimador de estados desacoplado rápido para a modelagem da rede no nível de subestação. Pretende-se, assim, compensar o aumento do custo computacional ocasionado pela modelagem detalhada da rede elétrica, devido à inserção de novas variáveis de estado e pseudomedidas, com o uso do estimador desacoplado. Ressalta-se que o custo computacional dos estimadores desacoplados é comprovadamente inferior se comparado com o estimador de estados convencional (ABREU, GARCIA, MONTICELLI, 1979; LO, MAHMOUD, 1986).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um estimador de estados generalizado que utilize técnicas de desacoplamento, visando a redução do custo computacional ocasionado pela inserção de variáveis de estados resultante da modelagem no nível de subestação adotada nessa abordagem. Como resultado, tem-se uma ferramenta mais eficiente para processamento de redes elétrica modeladas nesse nível de detalhe e, conseqüentemente, para processamento de erros de topologia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantar o estado da arte acerca dos problemas de estimação de estados no nível de seção de barras;
- Estudar os modelos utilizados nos estimadores desacoplados;
- Estudar a modelagem da rede no nível de seção de barras;
- Implementar o estimador desacoplado considerando a modelagem no nível de subestação;
- Validar e testar a metodologia desenvolvida em sistemas teste do IEEE.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a modelagem da rede no nível de seção de barras associada à estimação de estados generalizada, bem como o estimador de estados desacoplado, até então restrito à modelagem barra-ramo da rede, cuja eficiência computacional está reportada e comprovada na literatura.

A principal contribuição consiste no desenvolvimento de um estimador de estados generalizado, ou seja, que considera a modelagem da rede no nível de subestação, levando em consideração as técnicas de desacoplamento apresentadas na literatura apenas para a modelagem barra-ramo.

A abordagem generalizada da estimação de estados implica na extensão do vetor de estados, sendo incluídos neste os fluxos de potência através dos disjuntores. Neste trabalho esse vetor é particionado, considerando a abordagem desacoplada. Dessa forma as variáveis de estado são divididas em variáveis de natureza ativa e variáveis de natureza reativa. Da mesma maneira, as medidas também seguem este padrão. No problema generalizado, as informações relativas aos *status* dos disjuntores são incluídas no vetor de medidas, sendo estas informações denominadas de pseudomedidas operacionais. Portanto, o vetor de medidas é estendido considerando as medidas convencionais e as pseudomedidas. Esse vetor estendido é igualmente particionado em medidas/pseudomedidas ativas e reativas.

O desenvolvimento da formulação do estimador de estados generalizado desacoplado e os resultados obtidos demonstram a viabilidade do desacoplamento

das novas variáveis de estado e das pseudomedidas associadas à modelagem detalhada da rede, evidenciando a eficiência desse estimador em termos de custo computacional.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido em 6 capítulos. O primeiro corresponde a uma breve introdução ao assunto estudado, os objetivos, as contribuições e a organização do estudo realizado.

O Capítulo 2 é uma revisão da estimação de estados generalizada, descrevendo primeiramente o estimador de estados convencional. Neste capítulo, ainda são citados o método de *Tableau* Esparsa, a estimação de estados em dois estágios e o processamento de erros de topologia, este último por ser um dos principais processos beneficiados pela ferramenta proposta nesse trabalho.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão sobre os estimadores de estados desacoplados: o estimador de estados desacoplado comum, o qual são apresentados dois métodos: desacoplado no algoritmo e desacoplado no modelo, e o estimador de estados desacoplado rápido.

O Capítulo 4 contempla a contribuição deste trabalho. Assim, apresenta-se a formulação proposta para o estimador de estados generalizado desacoplado rápido que contempla ao mesmo tempo a modelagem da rede no nível de seção de barras e as técnicas de desacoplamento aplicadas em sistemas de transmissão.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo de estimação de estados generalizado desacoplado proposto neste trabalho. Situações e configurações distintas são abordadas em simulações com sistemas-teste padrão do IEEE.

Por fim, o Capítulo 6 traz as considerações gerais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA

2.1 INTRODUÇÃO

A estimação de estados para sistemas elétricos foi proposta por Schweppe e Wildes (1970), sendo aplicada através da modelagem barra-ramo do sistema. De acordo com Alsaç *et al* (1998), nesse modelo, a aproximação obtida dos estados tem êxito quando são válidas as premissas para a estimação dos estados convencional. Em caso de não atendimento dessas premissas, o processo de estimação torna-se não confiável. Por exemplo, um erro típico de topologia pode aparecer na forma de múltiplos dados errôneos. Assim, durante a análise destes dados, os dados confiáveis em sua vizinhança são classificados como erros grosseiros e então, eliminados do conjunto de medidas. Assim, conforme a redundância de medidas diminui, as indicações de dados errôneos desaparecem, porém, o erro de topologia, ou seja, dos *status* dos ramos chaveáveis, continua existente.

Desta forma, visando estimar os estados de uma maneira mais abrangente, no sentido de identificar erros de topologia existentes, foram desenvolvidos, a partir da década de 1990, vários estudos para a modelagem de dispositivos chaveáveis. Inicialmente Monticelli e Garcia (1991) desenvolveram uma modelagem de ramos com impedância nula. Em Monticelli (1993b), foi examinado o impacto da referida modelagem na estimação de estados, já antevendo o processamento de dados espúrios. Monticelli (1993a) estende os conceitos de variáveis de estados e ilhas observáveis para possibilitar a modelagem de dispositivos chaveáveis (disjuntores e chaves). Em Abur, Kim e Çelik (1995) são identificados erros de *status* de disjuntores através da identificação de erros de medida analógicos, considerando o estimador que utiliza o método dos mínimos valores absolutos. Este artigo propõe que a estimação seja realizada em dois estágios, com o intuito de evitar a modelagem de todo o sistema elétrico no nível de subestação. No primeiro estágio da estimação, é utilizada a modelagem barra-ramo da rede. O resultado do primeiro estágio fornece um conjunto de barras suspeitas, cujas configurações das subestações podem não estar corretas. Esse conjunto então, é modelado no nível de subestação, permitindo que o estimador identifique erros de *status* de disjuntores na presença de erros de medidas analógicas.

Com a evolução dos estudos aplicados para modelagem no nível de subestação, foi proposto em *Alsaç et al.* (1998) o estimador de estados generalizado, a partir de alterações na formulação do estimador de estados convencional, com a inclusão de medidas em dispositivos chaveáveis (seccionadoras e disjuntores) e pseudomedidas de injeção nula em barras de passagem. A observabilidade do sistema é estendida para as tensões nas barras e para os fluxos nos dispositivos manobráveis. Esta modelagem mais abrangente do sistema permite que erros de topologia sejam detectados mais facilmente, porém, novos estados e pseudomedidas são adicionados ao problema.

A partir da breve elucidação sobre o desenvolvimento dos estudos na área de estimação de estados generalizada realizada acima, é apresentada, no item subsequente, a fundamentação teórica e a formulação básica do problema de estimação de estados. Na sequência é apresentada a modelagem do estimador de estados generalizado. Dentre os métodos existentes para solução do estimador de estados formulados pelo método dos mínimos quadrados, é citado aqui o método de Tableau Esperso. Neste capítulo também é evidenciada a estimação de estados em dois estágios, utilizada em estimadores generalizados, em áreas do sistema em que existem erros de medidas e de *status* de disjuntores. Por fim, é realizada uma breve explicação sobre processamento de erros de topologia, o qual é diretamente beneficiado pela nova abordagem proposta nesse trabalho.

2.2 ESTIMADOR DE ESTADOS

As mudanças no setor elétrico, bem como as exigências aplicadas pelos órgãos reguladores do sistema elétrico, tornam cada vez mais necessária a utilização desta ferramenta para suporte à operação em tempo real e para isto, também é necessário que os modelos dos estimadores de estados sejam adaptados.

A maioria dos programas de estimação comerciais são formulados com sistemas de equações não lineares e resolvidos através do método dos mínimos quadrados ponderados (MONTICELLI, 2000). O conjunto de medidas e os erros de medição estão relacionados da seguinte forma:

$$z_m = z_o + e_m \quad (2.1)$$

onde:

z_m é o vetor $N_m \times 1$ de quantidades medidas, que compõe o plano de medição, sendo N_m o número de medidas ($N_m > (2N_b - 1)$);

z_o é o vetor $N_m \times 1$ correspondente aos valores verdadeiros das grandezas medidas;

N_b é o número de barras do sistema e,

e_m é o vetor $N_m \times 1$ que corresponde ao erro de medição (imprecisão dos medidores, erros de transformadores como instrumentos, erros de comunicação, efeitos de conversão analógico-digital).

Considerando que o erro de medição e_m apresenta distribuição normal e adotando-se média zero para o mesmo ($E(e_m) = 0$), sendo $E(.)$ o valor esperado, e ainda, que a matriz de covariância R_m é uma matriz diagonal, sem haver correlação entre os erros de medição, tem-se:

$$E(e_m e_m^T) = R_m \quad (2.2)$$

O modelo de medição é então apresentado por:

$$z_m = h_m(x) + e_m \quad (2.3)$$

onde:

x é o vetor $n \times 1$ de variáveis de estados, sendo $n = 2N_b - 1$;

$h_m(.)$ é o vetor $N_m \times 1$ de funções não lineares que relacionam as quantidades medidas às variáveis de estado x .

O vetor dos valores verdadeiros das quantidades medidas pode ser representado através de funções não lineares:

$$z_o = h_m(x) \quad (2.4)$$

Lourenço (2001) cita que uma boa distribuição de medidas no sistema a ser estimado aliado à redundância de medidas (ρ) são muito importantes para o

processo de estimação. Uma condição necessária, porém, não suficiente, é que a quantidade de medidas seja maior que a quantidade de estados, ou seja, $\rho > 1$. Dessa forma, é possível detectar medidas com erros grosseiros, isto é, medidas com grau de imprecisão muito maior do que é suportado no modelo de medição. A redundância global é definida por:

$$\rho \triangleq \frac{N_m}{n} = \frac{N_m}{2N_b - 1} \quad (2.5)$$

Já a redundância local refere-se à quantidade de medidas e conjuntos críticos presentes no conjunto de medição, lembrando que uma medida é dita crítica se a retirada desta torna o sistema, antes observável, em não-observável. Conjunto crítico por sua vez, consiste num conjunto de medidas para o qual a retirada de um de seus membros torna as medidas remanescentes críticas.

O vetor dos estados estimados é determinado de forma a minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos das medidas. Estes resíduos da estimação dos estados são obtidos através da equação:

$$r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2.6)$$

onde:

\hat{x} é o vetor de estados estimados;

$h_m(\cdot)$ é o vetor $N_m \times 1$ de funções não lineares que relacionam as quantidades medidas às variáveis de estado estimadas \hat{x} .

Aplicando-se o método dos mínimos quadrados, é realizada uma estimativa para os valores dos estados, através da minimização da função objetivo dada por:

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (2.7)$$

onde:

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

O problema de minimização descrito é resolvido iterativamente. Conforme Monticelli (1999), os estimadores formulados pelo método dos mínimos quadrados podem ter as seguintes maneiras de solução:

- Equação Normal (método clássico);
- Métodos Ortogonais (Reflexões de Golub, Rotação de Givens);
- Métodos Desacoplados, que exploram o desacoplamento P Θ -QV;
- Método *Tableau* Esparsa (Hachtel ou Matriz Aumentada).

2.3 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO

O estimador de estados generalizado proposto em Alsaç *et al.* (1998) é uma extensão do estimador de estados convencional e foi desenvolvido com a finalidade de possibilitar o processamento de redes modeladas no nível de subestação, permitindo, assim, aprimorar o processamento de erros de topologia, já que inclui a representação dos *status* de chaves seccionadoras e disjuntores.

2.3.1 Modelagem de Ramos Chaveáveis

Para evitar problemas de condicionamento numérico na modelagem de ramos chaveáveis na estimação de estados generalizada, foi proposta por Monticelli (1991,1993a,1993b) uma nova representação para chaves e disjuntores que elimina a utilização dos valores de impedância desses dispositivos (zero ou infinita para dispositivos fechados ou aberto, respectivamente) no modelo matemático do estimador de estados. Essa abordagem elimina os problemas numéricos advindos da representação de chaves e disjuntores por valores atípicos de impedância, como valores significativamente pequenos para representar dispositivos fechados e valores significativamente elevados para representar dispositivos abertos. Essa nova representação foi utilizada por Alsaç *et al.* (1998) quando da proposta do estimador de estados generalizado.

No estimador de estados generalizado, são adicionadas novas variáveis de estados ao problema de estimação, além das magnitudes de tensão e dos ângulos das tensões nas barras. Essas novas variáveis são os fluxos de potência ativa (t_{ij}) e reativa (u_{ij}) através dos ramos chaveáveis Alsaç *et al.* (1998), em que i e j são os nós das extremidades dos ramos. Assim, o vetor de estados estendido pode ser representado por:

$$\bar{x} = [\theta^T \quad V^T \quad t^T \quad u^T]^T \quad (2.8)$$

onde:

V e Θ 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 ramos chaveáveis, respectivamente.

Além disso, a nova formulação contempla as informações (ou medidas digitais) a respeito dos status dos ramos chaveáveis, que são incluídas na formulação do problema de estimação de estados como novas equações. 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:

$$V_i - V_j = 0 \quad (2.9)$$

$$\Theta_i - \Theta_j = 0 \quad (2.10)$$

Por outro lado, se o dispositivo estiver aberto, os fluxos de potência ativa e reativa através dele são nulos, ou seja:

$$t_{ij} = 0 \quad (2.11)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (2.12)$$

Finalmente, a modelagem no nível de seção de barras requer a revisão das expressões das injeções de potência 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 nos ramos incidentes a essa barra. Nesse somatório, os fluxos de potência nos 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 nos ramos chaveáveis devem ser expressos diretamente em função das novas variáveis de estado. Assim, as equações de injeção de potência ativa e reativa são expressas por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (2.13)$$

$$Q_k = -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (2.14)$$

onde:

Ω_k é o conjunto de barras conectadas a barra k por meio de ramos convencionais;

Γ_k é o conjunto de barras conectadas a barra k por meio de ramos chaveáveis.

As equações (2.8) a (2.14) representam a modelagem da rede no nível de seção de barras. A formulação do problema de estimação de estados a partir dessa modelagem proposta por Monticelli (1991,1993a,1993b) foi formalizada como estimação de estados generalizada em Alsaç *et al.* (1998), e aplicada em diversos trabalhos posteriormente, em especial em pesquisas relacionadas a identificação de erros de topologia como em (LOURENÇO, 2001; COLZANI, 2001; KORRES, 2006).

2.3.2 Estimação de Estados Generalizada como um problema de Otimização Restrito

A Estimação de Estados Generalizada pode ser tratada como um problema de otimização restrito como proposto por Clements; Simões Costa (1998), no qual ramos de impedância nula e injeções de potência ativa e reativa nulas através de barras de passagem são acrescentadas ao problema de minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos como restrições.

As restrições correspondentes aos *status* de disjuntores fechados e abertos, conforme representado pelas equações (2.9) a (2.12), são denominadas *restrições operacionais*, uma vez que o *status* do dispositivo de manobra pode ser modificado de acordo com o comportamento operacional da rede. Desta forma, o conjunto de restrições operacionais será representado daqui por diante por:

$$h_o(x)=0 \quad (2.15)$$

As injeções de potência nulas em barras ou nós de passagem são denominadas de *restrições estruturais* e são representadas por:

$$p_i=0 \quad (2.16)$$

$$q_i=0 \quad (2.17)$$

onde:

p_i e q_i são as injeções de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra i .

Outra restrição estrutural é formada pelas barras de referência, que contemplam tanto a referência angular como as referências para as barras isoladas da rede, muito comuns na representação no nível de seção de barras. O conjunto de restrições estruturais será genericamente definido por:

$$h_s(x)=0 \quad (2.18)$$

Considerando as restrições mencionadas acima, o processo de estimação no qual é realizado a minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos, torna-se um problema de otimização restrito e que pode ser descrito por (CLEMENTS; SIMÕES COSTA,1998):

$$\text{minimizar} \quad \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \quad (2.19)$$

$$\text{sujeito a:} \quad r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2.20)$$

$$h_o(\hat{x})=0 \quad (2.21)$$

$$h_s(\hat{x})=0 \quad (2.22)$$

onde:

r_m é o vetor $N_m \times 1$ de resíduos das medidas;

R_m^{-1} é a matriz $N_m \times N_m$ diagonal de covariância dos erros de medição;

\hat{x} é o vetor $n \times 1$ dos estados estimados.

2.4 METODO DE TABLEAU ESPARSO

A característica de cada problema de estimação está atrelada ao método de solução que deverá ser adotado para tal, visando um bom condicionamento de matrizes e a estabilidade numérica do estimador. Neste item, apresenta-se o Método de Tableau Esparso, que é considerado um caso particular do método da Matriz Aumentada de Hachtel, proposto por (GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985). Conforme reportado em Abur (2004), o desempenho do Método da Matriz Aumentada quanto a requisitos de memória e número de operações é amplamente satisfatório quando comparado a outros métodos de solução de sistemas esparsos.

O problema de estimação de estados pode ser representado por:

$$\text{Min } \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \quad (2.23)$$

$$\text{s.a. } \begin{cases} c(\hat{x})=0 \\ r_m=z_m-h_m(\hat{x}) \end{cases} \quad (2.24)$$

onde:

$c(\hat{x})$ é o vetor de equações não lineares relacionadas às medidas virtuais (injeções de potências nulas);

r_m é o vetor $N_m \times 1$ de resíduos de medidas, sendo N_m a quantidade de medidas;

R_m é a matriz de covariância dos erros de medição, suposta diagonal e de dimensão $N_m \times N_m$;

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

\hat{x} é o vetor $(2N_b-1) \times 1$ de estimativas para os estados da rede, sendo N_b o número de barras do sistema;

z_m são as medidas reais.

A partir da formulação apresentada nas equações (2.23) e (2.24), obtém-se a função Lagrangeana para a resolução do problema de otimização, que é dada por:

$$L = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m - \lambda_m^t (-z_m + h_m(\hat{x}) + r_m) - \lambda_v^t c(\hat{x}) \quad (2.25)$$

onde:

λ_m é o vetor de multiplicadores de Lagrange relacionados às restrições de resíduo;

λ_v é o vetor de multiplicadores de Lagrange relacionados às medidas virtuais.

As condições de Karush-Kuhn-Tucker de primeira ordem determinam o sistema não linear necessário para a obtenção da solução ótima.

$$\frac{\partial L}{\partial r_m} = R_m^{-1} r_m - \lambda_m = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = H_m^T(\hat{x}) \lambda_m + C(\hat{x})^T \lambda_v = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_m} = -z_m + h_m(\hat{x}) + r_m = 0 \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_v} = c(\hat{x}) = 0 \quad (2.29)$$

onde:

$$H_m(\hat{x}) = \frac{\partial h_m(\hat{x})}{\partial \hat{x}}$$

Sendo que $H_m(\hat{x})$ tem dimensões $N_m \times n$, sendo N_m o número de medidas e n o número de estados.

Da equação (2.26), tem-se que $r_m = R_m \lambda_m$.

Obtém-se, então, a forma matricial para resolução do método da Matriz Aumentada de Hachtel, cuja solução é encontrada de forma iterativa.

$$\begin{bmatrix} R_m & H(\hat{x}^k) & 0 \\ H^t(\hat{x}^k) & 0 & C^t(\hat{x}) \\ 0 & C(\hat{x}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_m^k \\ \Delta \hat{x}^k \\ \lambda_v^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ 0 \\ -c(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

O processo iterativo é realizado através da formulação abaixo, até ser atingida a convergência:

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta \hat{x}^k$$

No método de *Tableau* Esperso o conjunto de medidas é composto por dois conjuntos. O primeiro conjunto corresponde às medidas de fluxo de potência e

magnitudes de tensão e o segundo, ao conjunto de medidas de injeção de potência. O sistema matricial a ser resolvido iterativamente é:

$$\begin{bmatrix} R_i & 0 & H_i(\hat{x}^k) & 0 \\ 0 & R_m & H(\hat{x}^k) & 0 \\ H_i^t(\hat{x}^k) & H^t(\hat{x}^k) & 0 & C^t(\hat{x}) \\ 0 & 0 & C(\hat{x}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_i^k \\ \lambda_m^k \\ \Delta \hat{x}^k \\ \lambda_v^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_i - h_i(\hat{x}^k) \\ z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ 0 \\ -c(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

onde:

o índice i refere-se às medidas de fluxo e magnitudes das tensões e o índice m , às medidas de injeções de potência.

2.5 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM DOIS ESTÁGIOS

A estimação de estados em dois estágios proposta por Monticelli (1993a) e aplicada em Abur, Kim e Çelik (1995) veio no sentido de limitar a modelagem da estimação dos estados no nível de subestação apenas para áreas em que existam erros de telemidas ou de *status* manualmente atualizados de disjuntores, a qual gera um modelo incorreto para o estimador.

Como a maior parte da informação a respeito dos *status* sobre ramos chaveáveis é apresentada no sistema de supervisão e controle de um centro corretamente, é desnecessário que todos os ramos chaveáveis do sistema de potência supervisionado sejam representados como ramos de impedância nula, além de ser inviável computacionalmente.

Desta forma, a modelagem da rede é realizada em dois estágios: o primeiro utiliza a modelagem barra-ramo da rede e o segundo, a modelagem no nível de seção de barra.

O primeiro estágio compreende a primeira parte da execução do estimador, onde é realizada a estimação no modelo barra-ramo da rede elétrica. Neste estágio, através dos resíduos de estimação encontrados, pode-se selecionar partes do sistema que contenham subestações com erros de topologia.

Após o primeiro estágio, o segundo estágio é aplicado no processo de estimação, através da remodelagem do sistema reduzido gerado a partir da região

de impacto dos erros do sistema, definida como zona de anomalia. O sistema reduzido é denominado de sub-rede relevante, o qual compreende as barras de subestações que possam conter erros de topologia. A remodelagem é então realizada no nível de seção de barra e o restante do sistema é mantido no formado original (LOURENÇO, 2001).

Coelho, T. C. (2007), Colzani (2001), Abur, Çelik e Kim (1995) e Alsaç *et al.* (1998) propuseram métodos para a obtenção da referida zona de anomalia.

Ressalta-se que na sub-rede relevante não devem haver disjuntores fechados em seções radiais, pois este tipo de configuração provoca a não-detectabilidade de erros nos *status* de tais disjuntores. A representação explícita de disjuntores abertos nesta modelagem pode ocasionar também o ilhamento em barras ou em parte de disjuntores da rede.

A identificação de erros de topologia é possível, então, desde que disjuntores abertos sejam representados e de que haja o tratamento de sub-redes relevantes formadas por mais de uma ilha. Os erros nos *status* dos disjuntores se refletem nas restrições operacionais correspondentes do problema de estimação, possibilitando assim, a identificação da topologia correta da rede. O problema de ilhamento pode ser resolvido através de definição de uma barra de referência para cada sub-rede relevante em análise, permitindo que estimações possam ser realizadas mesmo nesse caso, ou ainda, através de informações *a priori* conforme proposto em (LOURENÇO, 2001).

2.6 PROCESSAMENTO DE ERROS DE TOPOLOGIA

A representação explícita de dispositivos chaveáveis no problema de estimação de estados é um benefício para o processamento de erros de topologia, pois o diagnóstico de situações anormais como erros de *status* (lógicos) e de medidas (analógicos) é facilitado neste tipo de modelagem.

Após a convergência do processo de estimação no segundo estágio citado no item 2.5, no qual o problema de estimação é formulado como um problema de otimização restrito, os multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais são calculados e utilizados para detectar e identificar os erros de topologia (LOURENÇO, 2001).

Lourenço (2001) utilizou o teste de hipóteses via teorema de Bayes para detecção de erros de topologia, sendo o processo de detecção de erros dividido em três etapas. A primeira verifica se existem erros de topologia, a segunda etapa seleciona os dispositivos chaveáveis suspeitos e a terceira, detecta os erros através do teste de hipóteses. Este método evita a reestimação dos estados, tornando a identificação de erros mais rápida. Outra ferramenta aplicada no processo de identificação de erros, é o teste geométrico, que consiste na interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange. O teste geométrico foi proposto em (LOURENÇO, 2001).

Coelho (2012) propôs a aplicação do teste geométrico em três estágios: o primeiro, encontrado em Lourenço *et al.* (2006), garante que todos os elementos erroneamente modelados estejam inseridos no conjunto dos suspeitos, conjuntamente com a pré-identificação obtida pelo Multiplicador de Lagrange Normalizado. O segundo estágio do teste permite que seja processada a natureza do erro, ou seja, verificando se a origem do mesmo é um erro de topologia, erro grosseiro em medidas ou presença simultânea de erros de topologia e erros em medidas. Já no terceiro estágio, são verificadas, a partir da natureza do erro obtida no segundo estágio, as informações contidas no conjunto dos erros suspeitos, selecionando os verdadeiros erros e excluindo aquelas previamente selecionadas por engano.

Ferramentas para o processamento de erros de topologia não foram aplicadas neste trabalho, mas são beneficiárias da abordagem aqui proposta.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Foram apresentados neste capítulo os conceitos básicos relacionados à estimação de estados generalizada. Dentre os métodos existentes para a solução de sistemas esparsos presentes na estimação de estados, destacou-se o método de Tableau Esparso. Foi enfatizado o processo de estimação em dois estágios, no qual propõe a utilização do estimador generalizado em regiões da rede elétrica suspeitas de conterem erros de topologia. O capítulo também faz referência ao processamento de erros de topologia, amplamente estudado recentemente, sendo o principal

beneficiado da estimação de estados generalizada e também da abordagem desacoplada proposta nesse trabalho.

3 ESTIMADORES DE ESTADOS DESACOPLADOS

3.1 INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta o método desacoplado utilizado na resolução do problema do estimador de estados. A principal justificativa para tal é a redução das operações para a fatoração da matriz ganho, obtida a partir do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados utilizado no estimador. Abur e Gómez-Expósito (2004) afirmam que os estimadores desacoplados seguem as mesmas aproximações do fluxo de potência desacoplado. Desta forma, foram estudados ao longo do tempo, os estimadores desacoplados, considerando o desacoplamento $P\Theta$ - QV e uso de matrizes constantes, tais como a matriz de ganho ou informação G ou a matriz Jacobiana H , sendo observado que os elementos presentes na matriz de ganho formada pela partida plana são análogos aos da matriz ganho obtida pela solução convergida.

3.2 ESTIMADOR DE ESTADOS DESACOPLADO COMUM

O desacoplamento para a estimação de estados foi proposto por Rossier, Horisberger e Richard (1976), para resolver problemas do método dos Mínimos Quadrados Ponderados em sistemas elétricos de grande escala, considerando o desacoplamento $P\Theta$ - QV , a iteração alternada das equações (P e Q) e submatrizes fixas e simplificadas da matriz ganho.

Em Abreu, Garcia e Monticelli (1979), foram propostos dois tipos de estimadores desacoplados, o desacoplado no algoritmo e o desacoplado no modelo, que serão mostrados nos itens 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente, além de um método para o processamento de erros.

Já em Lo e Mahmoud (1986), as aproximações foram feitas na matriz Jacobiana proporcionando redução do armazenamento computacional e tempo de solução reduzido. O problema original é desacoplado em dois subproblemas lineares, chamados de P - Θ e Q - V . Os problemas são resolvidos de forma sequencial até atingir a solução final e os elementos da matriz Jacobiana são aproximados,

tornando-se constantes. Desta forma, somente é necessário efetuar as operações na matriz Jacobiana na primeira iteração, o que reduz o tempo de solução, bem como diminui o uso de memória computacional (LO; MAHMOUD, 1986).

Para a resolução do problema de estimação de estados supõe-se que o vetor de quantidades medidas seja tal que:

$$z = \begin{bmatrix} z_P \\ z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ p \\ u \\ q \\ V \end{bmatrix}$$

sendo,

$$z_P = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix}$$

onde:

t é o vetor de medidas de fluxo de potência ativa;

p é o vetor de medidas de injeção de potência ativa e,

$$z_Q = \begin{bmatrix} u \\ q \\ V \end{bmatrix}$$

onde:

u é o vetor de medidas de fluxo de potência reativa;

q é o vetor de medidas de injeção de potência reativa e V é o vetor de magnitude de tensão nas barras.

Representa-se a matriz de covariância conforme a equação (3.1).

$$R = \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

A matriz Jacobiana das funções não lineares $h(x)_P$ e $h(x)_Q$, correspondente a este modelo de medição é escrito conforme a equação (3.2).

$$H(V,\theta) = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & H_{PV} \\ H_{Q\theta} & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde:

$H_{P\theta} = \frac{\partial h(x)_P}{\partial \theta}$ e $H_{PV} = \frac{\partial h(x)_P}{\partial V}$ são as submatrizes de primeiras derivadas das funções $h(x)_P$, relacionadas às medidas ativas com respeito ao ângulo e magnitude das tensões complexas nas barras;

$H_{Q\theta} = \frac{\partial h(x)_Q}{\partial \theta}$ e $H_{QV} = \frac{\partial h(x)_Q}{\partial V}$ são as submatrizes de primeiras derivadas das funções $h(x)_Q$, relacionadas às medidas reativas com respeito ao ângulo e magnitude das tensões complexas nas barras.

A partir de desenvolvimentos matriciais obtém-se a matriz ganho decomposta em submatrizes correspondentes a partição das medidas, chegando-se a equação (3.3).

$$\begin{bmatrix} G_{P\theta} & G_{PV} \\ G_{Q\theta} & G_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

onde:

$$G_{P\theta} = H_{P\theta}^t R_P^{-1} H_{P\theta} + H_{Q\theta}^t R_Q^{-1} H_{Q\theta}$$

$$G_{PV} = H_{P\theta}^t R_P^{-1} H_{PV} + H_{Q\theta}^t R_Q^{-1} H_{QV}$$

$$G_{Q\theta} = H_{PV}^t R_P^{-1} H_{P\theta} + H_{QV}^t R_Q^{-1} H_{Q\theta}$$

$$G_{QV} = H_{PV}^t R_P^{-1} H_{PV} + H_{QV}^t R_Q^{-1} H_{QV}$$

Em linhas de transmissão com nível de tensão acima de 230 kV, a relação X/R é alta. Nessa situação, observa-se uma predominância das submatrizes $H_{P\theta}$ e H_{QV} sobre H_{PV} e $H_{Q\theta}$, da mesma forma que $G_{P\theta}$ e G_{QV} sobre G_{PV} e $G_{Q\theta}$.

Através do método desacoplado, é possível o desmembramento do processo de estimação em dois tipos de estimadores: desacoplados no algoritmo e desacoplados no modelo.

3.2.1 Estimadores Desacoplados no Algoritmo

Este estimador considera um perfil plano de tensões ($V_i = 1$ pu e $\Theta_i = 0^\circ$ para todas as barras) para as submatrizes $G_{P\Theta}$ e G_{QV} , desprezando-se as submatrizes G_{PV} e $G_{Q\Theta}$. As iterações do algoritmo, então, são executadas conforme as equações (3.4) e (3.5).

$$G_{P\Theta}\Delta\theta = \begin{bmatrix} H_{P\Theta}^t(\theta^k, V^k) \\ H_{Q\Theta}^t(\theta^k, V^k) \end{bmatrix}^T R^{-1} [z_p - h_p(\theta^k, V^k)] \quad (3.4)$$

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta\theta$$

$$G_{QV}\Delta V = \begin{bmatrix} H_{PV}^t(\theta^k, V^k) \\ H_{QV}^t(\theta^k, V^k) \end{bmatrix}^T R^{-1} [z_q - h_q(\theta^k, V^k)] \quad (3.5)$$

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V$$

Sendo a equação (3.4) a metade da iteração correspondente ao cálculo do incremento $\Delta\theta$ e a equação (3.5) a metade da iteração correspondente ao cálculo do incremento ΔV .

As aproximações realizadas no método apenas afetam o processo de convergência do problema considerando o problema sem o desacoplamento, porém, o resultado final obtido é o mesmo.

3.2.2 Estimadores Desacoplados no Modelo

Neste caso, consideram-se aproximações realizadas na matriz Jacobiana H , que é calculada para um perfil plano de tensões ($V_i = 1$ pu e $\Theta_i = 0^\circ$ para todas as barras), desprezando-se as submatrizes H_{PV} e $H_{Q\Theta}$, sendo as resistências das linhas de transmissão desprezadas na submatriz $H_{P\Theta}$. Dessa forma, as iterações do algoritmo são executadas conforme as equações (3.6) e (3.7).

$$G'_{P\Theta}\Delta\theta = H_{P\Theta}^t R_P^{-1} [z_p - h_p(\theta^k, V^k)] \quad (3.6)$$

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta\theta$$

$$G'_{QV}\Delta V = H_{QV}^t R_Q^{-1} [z_q - h_q(\theta^k, V^k)] \quad (3.7)$$

$$V^{k+1} = V^k + \Delta V$$

A equação (3.6) é a metade da iteração correspondente ao cálculo do incremento $\Delta\theta$ e a equação (3.7), a metade da iteração correspondente ao cálculo do incremento ΔV , onde:

$$G'_{P\theta} = H_{P\theta}^t R_P^{-1} H_{P\theta} \quad (3.8)$$

$$G'_{QV} = H_{QV}^t R_Q^{-1} H_{QV} \quad (3.9)$$

As aproximações realizadas no método podem afetar o resultado final. Porém, considerando o alto nível de magnitude de tensão do sistema (Extra Alta Tensão ou Ultra Alta Tensão) essas modificações no resultado podem ser desprezíveis (SIMÕES COSTA, 1998).

3.3 ESTIMADOR DE ESTADOS DESACOPLADO RÁPIDO

O método desacoplado rápido para a estimação de estados foi desenvolvido inicialmente por (HORISBERGER; RICHARD; ROSSIER, 1976). Os estimadores desacoplados rápidos introduzem aproximações na matriz Jacobiana, e não somente na matriz ganho. O desempenho do método também pode ser comparado com o fluxo de potência desacoplado rápido. Monticelli e Garcia (1990) afirmam que a versão para o estimador desacoplado rápido que apresenta a melhor performance é aquela que introduz as aproximações em ambos os lados da equação normal.

As equações das medidas no estimador desacoplado rápido são divididas em duas partes Monticelli e Garcia (1990):

- Medidas de potência ativa (denotadas pelo subscrito P): medidas de injeção de potência ativa nas barras e medidas de fluxo de potência ativo nos ramos;
- Medidas de potência reativa (denotadas pelo subscrito Q): medidas de injeção de potência reativa nas barras, medidas de fluxo de potência reativo nos ramos e medidas de magnitude de tensão nas barras.

É importante ressaltar que as medidas de corrente não são incluídas em nenhum dos grupos de medidas, pois não podem ser associadas a nenhum

subproblema, ou seja, não podem ser utilizadas diretamente na formulação desacoplada.

O algoritmo do estimador de estados desacoplado rápido utilizado neste trabalho considera as seguintes aproximações (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

- partida plana ($V_i = 1$ pu e $\Theta_i = 0^\circ$ para todas as barras);
- ignoram-se os elementos fora da diagonal na matriz de medidas Jacobiana (H_{PV} e $H_{Q\theta}$) e calculam-se os elementos da matriz ganho G com essa aproximação. Isso elimina os blocos da matriz ganho G que estão fora da diagonal, mantendo a matriz constante e desacoplada, conforme a matriz obtida com partida plana:

$$G = \begin{bmatrix} G_{P\theta} & 0 \\ 0 & G_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde:

$$G_{P\theta} = H_{P\theta}^t R_P^{-1} H_{P\theta} \text{ e } G_{QV} = H_{QV}^t R_Q^{-1} H_{QV}$$

- Consideram-se as mesmas aproximações para a matriz de medidas Jacobiana H quando se calcula o lado direito da equação:

$$T = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^t R_P^{-1} \Delta z_P' \\ H_{QV}^t R_Q^{-1} \Delta z_Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_P \\ T_Q \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\Delta z_P' = \frac{\Delta z_P}{V} \quad (3.12)$$

$$\Delta z_Q' = \frac{\Delta z_Q}{V} \quad (3.13)$$

$$\Delta z_P = z_P - h_P(\hat{x}) \quad (3.14)$$

$$\Delta z_Q = z_Q - h_Q(\hat{x}) \quad (3.15)$$

onde:

$\Delta z_P'$ e $\Delta z_Q'$ são as versões normalizadas de Δz_P e Δz_Q .

O processo iterativo é feito até que o critério de convergência seja atingido, ou seja, $\max|\Delta\theta| < \epsilon$ e $\max|\Delta V| < \epsilon$, sendo $\Delta\theta = G_{P\theta}^{-1} * T_P$ e $\Delta V = G_{QV}^{-1} * T_Q$.

Outra aproximação realizada no método desacoplado desconsidera as resistências série nas matrizes $H_{P\theta}$ e H_{QV} e é aplicada nos métodos denominados de BX e XB, apresentados em (MONTICELLI; GARCIA, 1990).

Considera-se o sistema descrito pela equação (3.10) para os Métodos BX e XB Estendidos, onde para o índice 0 consideram-se as matrizes computadas na partida plana e para o índice k consideram-se as matrizes computadas na k-ésima iteração:

$$\begin{bmatrix} H_{P\theta}^0 & H_{PV}^k \\ H_{Q\theta}^k & H_{QV}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_P^k \\ \Delta z_Q^k \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Desta forma, os modelos do estimador desacoplado rápido são (MONTICELLI, 1999):

- Estimador de estados desacoplado pelo Método BX Estendido

Considera-se a k-ésima iteração para a equação (3.10). Assim, as iterações do método de Gauss-Newton são realizadas considerando uma matriz Jacobiana aproximada, e as submatrizes $H_{P\theta}$ e H_{QV} consideradas para um perfil plano de tensões ($V_i = 1$ pu e $\theta_i = 0^\circ$ para todas as barras). O problema para o sistema transformado a ser resolvido é descrito pela equação (3.11).

$$\begin{bmatrix} H_{P\theta}^0 & H_{PV}^k \\ 0 & \tilde{H}_{QV}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_P^k \\ \Delta \tilde{z}_Q^k \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

onde:

$$\tilde{H}_{QV}^k = H_{QV}^0 - H_{Q\theta}^k H_{P\theta}^0 H_{PV}^k \text{ e } \tilde{z}_Q^k = z_Q^k - H_{Q\theta}^k H_{P\theta}^0 z_P^k$$

A pseudoinversa $H_{P\theta}^0 = ((H_{P\theta}^0)^T H_{P\theta}^0)^{-1} (H_{P\theta}^0)^T$ e as submatrizes Jacobianas $H_{Q\theta}^k$ e H_{PV}^k que aparecem na expressão para \tilde{H}_{QV}^k são computadas na partida plana.

- Estimador de estados desacoplado pelo Método XB Estendido

Da mesma forma que no método anterior, considera-se a k-ésima iteração para a equação (3.10). O problema a ser resolvido é descrito pela equação (3.18).

$$\begin{bmatrix} \tilde{H}_{P\theta}^k & 0 \\ H_{Q\theta}^k & H_{QV}^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tilde{z}_P^k \\ \Delta z_Q^k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

onde:

$$\tilde{H}_{P\theta}^k = H_{P\theta}^0 - H_{PV}^k H_{QV}^l H_{Q\theta}^k \text{ e } \tilde{z}_P^k = z_P^k - H_{PV}^k H_{QV}^l z_Q^k$$

A pseudoinversa $H_{QV}^l = ((H_{QV}^0)^T H_{QV}^0)^{-1} (H_{QV}^0)^T$ e as submatrizes Jacobianas H_{PV}^k e $H_{Q\theta}^k$ que aparecem na expressão para $\tilde{H}_{P\theta}^k$ são computadas na partida plana.

Os algoritmos de iteração das formulações acima podem ser encontrados em (MONTICELLI, 1999).

De acordo com as formulações expostas acima, pode ser verificado que o estimador de estados desacoplado apresenta grande vantagem quando há necessidade de soluções do problema rapidamente e com menor custo computacional. Este estimador também apresenta vantagem na aplicação em sistemas de distribuição, já que a utilização de matrizes constantes evita que o algoritmo contenha matrizes de grande dimensão a cada iteração, em razão da grande quantidade de nós desse sistema. Porém, a baixa relação X/R ainda é um problema quando se aplica o estimador de estados desacoplado rápido em sistemas de distribuição (MONTICELLI; GARCIA, 1990). Nogueira (2014) propôs a utilização da normalização complexa por unidade na estimação de estados, para adequar os baixos valores da relação X/R encontrados no sistema de distribuição aos valores encontrados no sistema de transmissão.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os métodos desacoplados existentes aplicados na estimação de estados. Ressalta-se aqui o método desacoplado rápido, que é o método utilizado no estimador desenvolvido neste trabalho. A principal justificativa para a utilização deste método nesse trabalho é a redução do tempo de solução do problema e do custo computacional, compensando o incremento de medidas e pseudomedidas relacionadas ao estimador de estados generalizado, conforme discutido no próximo capítulo.

4 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO

4.1 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 às subestações são perdidas.

A abordagem proposta por Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993b) apresenta uma solução para modelagem exata de ramos chaveáveis na formulação do problema de estimação de estados, resultando na Estimação de Estados Generalizada (ALSAÇ *et al.*, 1998). 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 (CLEMENTS; COSTA, 1998), (LOURENÇO *et al.*, 2006) e (JAÉN; EXPÓSITO, 2002).

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 Abur, Çelik e Kim (1995),

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 subestações pré-selecionadas para modelagem detalhada, reduzindo o problema da dimensão. No entanto, essa abordagem requer métodos eficientes para determinação da região suspeita para o seu sucesso. Outra abordagem, proposta em Jaén e Expósito (2002), 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 estimação de estados generalizada, este trabalho 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 trabalho para demonstrar a viabilidade da abordagem proposta. Resultados de simulações envolvendo o sistema teste IEEE 30 barras reforçam a aplicabilidade da nova ferramenta.

4.2 ESTIMADOR 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 trabalho e apresentada no item 4.3.

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, 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 pela equação (2.6).

Utilizando-se então o método dos mínimos quadrados ponderados, a estimativa para os valores dos estados é obtida minimizando-se a função objetivo representada pela equação (2.7).

A solução do problema representado pela equação (2.7) pode ser obtida resolvendo-se iterativamente o seguinte sistema linear:

$$(H^T R^{-1} H) \Delta \hat{x} = H^T R^{-1} (z - h(\hat{x})) \quad (4.19)$$

onde:

$G = H^T R^{-1} H$: matriz de ganho;

$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$: matriz Jacobiana;

R é matriz de covariância das medidas;

z é vetor de medidas.

A exemplo do que ocorreu com a formulação do problema de fluxo de potência, o desacoplamento P Θ -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 Rossier, Horisberger e Richard (1976), propõe ainda a separação do problema em duas partes: ativa (denominada pelo subscrito P) e reativa (denominada 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:

$$z_m = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_m^Q \end{bmatrix}, \text{ com } z_m^P = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix} \text{ e } z_m^Q = \begin{bmatrix} u \\ q \\ v \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

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:

$$R = \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

e a matriz Jacobiana, por:

$$H(V, \theta) = \begin{bmatrix} H_{PP} & 0 \\ 0 & H_{QQ} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

A matriz ganho correspondente pode ser representada por:

$$G = \begin{bmatrix} G_{PP} & 0 \\ 0 & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

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:

$$G \Delta \hat{x} = T \quad (4.24)$$

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. O item 4.3.1 apresenta a extensão proposta dessa formulação, tornando-a capaz de processar redes modeladas no nível de seção de barras.

4.3 DESACOPLAMENTO NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA

4.3.1 Extensão dos vetores de estado e vetores de medida

O presente trabalho propõe o uso da representação de chaves e disjuntores (*ramos chaveáveis*), proposta em Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993), 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, 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:

$$\mathbf{x}^{\text{est}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{\text{P}} \\ \mathbf{x}^{\text{Q}} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{x}^{\text{P}} = [\theta^{\text{T}} \quad \mathbf{t}^{\text{T}}]^{\text{T}} \quad \text{e} \quad \mathbf{x}^{\text{Q}} = [\mathbf{v}^{\text{T}} \quad \mathbf{u}^{\text{T}}]^{\text{T}} \quad (4.26)$$

onde:

\mathbf{V} e θ são os vetores de magnitude e fase das tensões nas barras, respectivamente; \mathbf{t} e \mathbf{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 \mathbf{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:

$$z^{\text{est}} = \begin{bmatrix} z_m \\ z_o \end{bmatrix}, \text{ com } z_o = \begin{bmatrix} z_o^P \\ z_o^Q \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Considerando o particionamento das medidas convencionais, definidos em (4.3), e a partição acima, relativa às informações operacionais, tem-se que:

$$z_P^{\text{est}} = \begin{bmatrix} z_m^P \\ z_o^P \end{bmatrix} \text{ e } z_Q^{\text{est}} = \begin{bmatrix} z_m^Q \\ z_o^Q \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

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);

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);

z_m^P é o conjunto de medidas ativas;

z_m^Q é o conjunto de medidas reativas.

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 com os estados são definidas por:

$$\begin{aligned}
P_k &= \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \\
Q_k &= -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl}
\end{aligned} \tag{4.29}$$

onde:

Ω_k é o conjunto de barras conectadas a barra k através de ramos convencionais;

Γ_k é o 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 (4.13) 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 da Estimção de Estados Generalizada (EEG) como pseudomedidas, aqui chamadas *pseudomedidas estruturais*, em alusão ao termo *restrições estruturais*, normalmente encontrado na literatura.

4.3.2 Solução pelo Método Desacoplado Rápido

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

$$z_m^P = \begin{bmatrix} t \\ p \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad z_m^Q = \begin{bmatrix} u \\ q \\ v \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

$$z_o^P = \begin{bmatrix} \theta_d \\ t_d \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad z_o^Q = \begin{bmatrix} V_d \\ u_d \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

onde:

$\theta_d = 0$ é a restrição de diferença angular nula para disjuntor fechado;

$V_d = 0$ é a restrição de diferença potencial nulo para disjuntor fechado;

$t_d = 0$ é a restrição de fluxo de potência ativa nula para disjuntor aberto;

$u_d = 0$ é a 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 proposto em (4.16):

$$H_{PP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & \frac{\partial t}{\partial t} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_d}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_d}{\partial t} \\ \frac{\partial t_d}{\partial \theta} & \frac{\partial t_d}{\partial t} \end{bmatrix}; H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & \frac{\partial t}{\partial u} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial \theta_d}{\partial V} & \frac{\partial \theta_d}{\partial u} \\ \frac{\partial t_d}{\partial V} & \frac{\partial t_d}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$H_{QP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta} & \frac{\partial u}{\partial t} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_d}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_d}{\partial t} \\ \frac{\partial u_d}{\partial \theta} & \frac{\partial u_d}{\partial t} \end{bmatrix}; H_{QQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial V} & \frac{\partial u}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial \theta_d}{\partial V} & \frac{\partial \theta_d}{\partial u} \\ \frac{\partial u_d}{\partial V} & \frac{\partial u_d}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

onde:

H_{PP} é a matriz Jacobiana das equações do problema ativo em relação às variáveis de estado do problema ativo;

H_{QP} é a matriz Jacobiana das equações do problema reativo em relação às variáveis de estado do problema ativo;

H_{PQ} é a matriz Jacobiana das equações do problema ativo em relação às variáveis de estado do problema reativo e;

H_{QQ} é 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:

$$H = \begin{bmatrix} H_{PP}^m & H_{PQ}^m \\ H_{PP}^o & H_{PQ}^o \\ H_{QP}^m & H_{QQ}^m \\ H_{QP}^o & H_{QQ}^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{PP} & H_{PQ} \\ H_{QP} & H_{QQ} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

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

$$R = \begin{bmatrix} R_P^m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_P^o & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_Q^m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_Q^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_P & 0 \\ 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

De acordo com a definição da matriz Ganho, vide equação (4.3), e com as definições acima acerca da matriz Jacobiana estendida, a matriz ganho G da EEG desacoplada, pode ser representada por:

$$G = \begin{bmatrix} H_{PP}^T R_P^{-1} H_{PP} & H_{PQ}^T R_Q^{-1} H_{PQ} \\ H_{QP}^T R_P^{-1} H_{QP} & H_{QQ}^T R_Q^{-1} H_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PP} & G_{PQ} \\ G_{QP} & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

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

$$H_{PP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} \\ \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} & 0 \\ 0 & \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad H_{PQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial t}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad H_{QP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad H_{QQ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} \\ \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} & 0 \\ 0 & \begin{cases} 0 \\ \pm 1 \end{cases} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

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, representado em (4.20), 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:

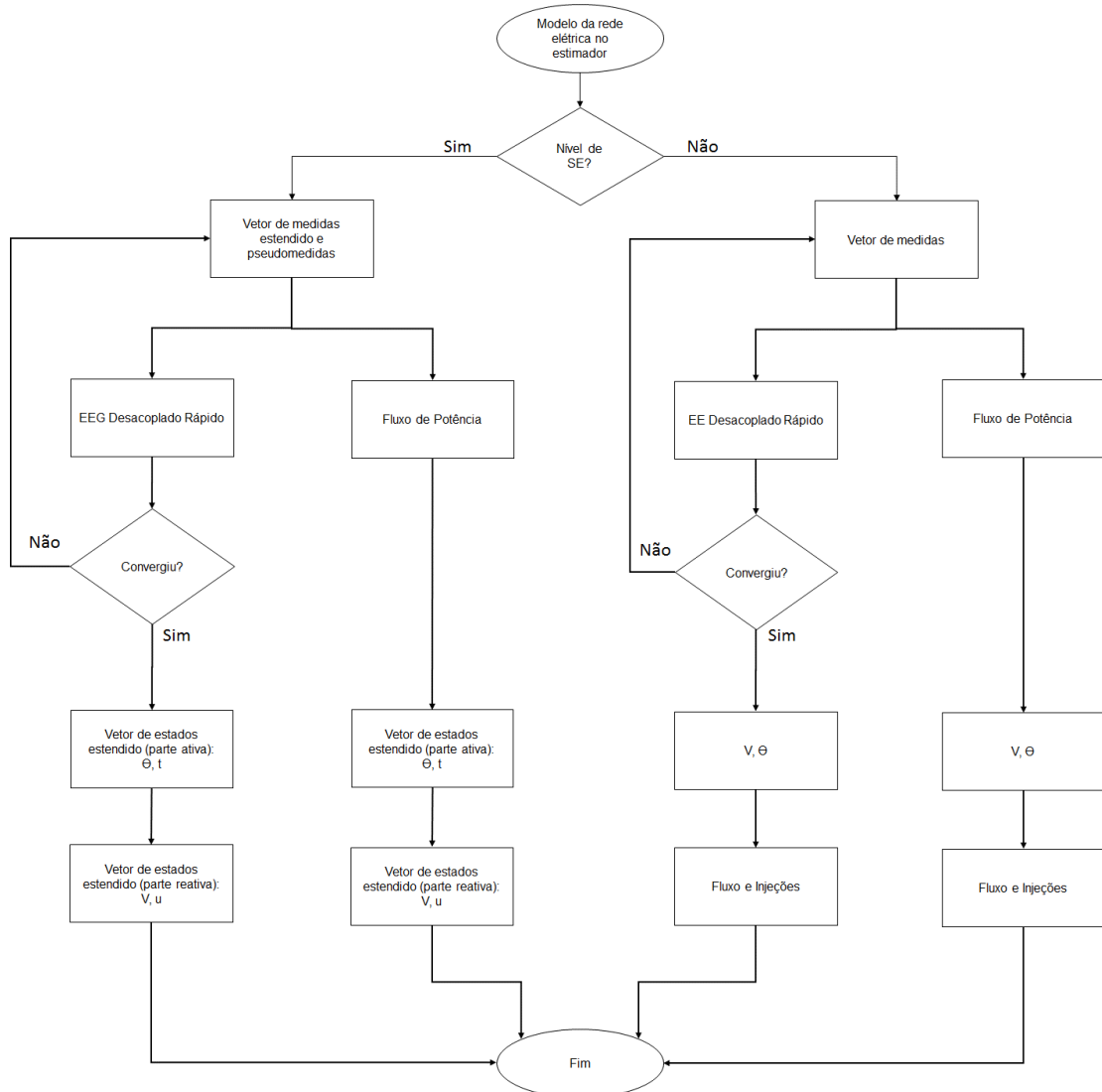
$$G = \begin{bmatrix} H_{PP}^T R_P^{-1} H_{PP} & 0 \\ 0 & H_{QQ}^T R_Q^{-1} H_{QQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PP} & 0 \\ 0 & G_{QQ} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Dessa forma, comprova-se que o problema de estimação de estados generalizada pode ser resolvido pelo algoritmo desacoplado, discutido anteriormente.

4.4 FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA

O fluxograma da metodologia proposta neste trabalho é apresentado na FIGURA 1.

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO.



FONTE: O autor (2016).

A partir da modelagem da rede, define-se qual será o tipo de estimação. Caso uma barra da modelagem barra-ramo seja estendida ao nível de subestação, o vetor de medidas também é estendido, com a inclusão das medidas e pseudomedidas relacionadas ao nível de seção de barras. Inicia-se então, o processo de estimação de estados generalizado, até que o critério de convergência seja alcançado ($\max|\Delta x| < \varepsilon$). No restante da rede que segue a modelagem barra-ramo, é realizado o processo de estimação convencional da mesma forma. Em ambos os casos, o fluxo de potência também é calculado, buscando validar e comparar os estados.

Após a convergência, os estados estendidos para a estimação no nível de seção de barras e os estados, fluxos e injeções de potência para a modelagem barra-ramo são encontrados.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta a metodologia proposta nesse trabalho para incorporar as técnicas de desacoplamento ao problema de estimação de estados generalizada, a qual contempla a utilização do método Desacoplado Rápido na estimação, já consolidado na literatura, em conjunto o estimador de estados generalizado. O propósito de sua aplicação é compensar o aumento de variáveis de estado e de pseudomedidas em consequência da modelagem de ramos do sistema elétrico com chaves e disjuntores na EEG com a redução do tempo de solução do problema de estimação, procurando, desta forma, adaptar a estimação generalizada para a solução em tempo real.

5 RESULTADOS

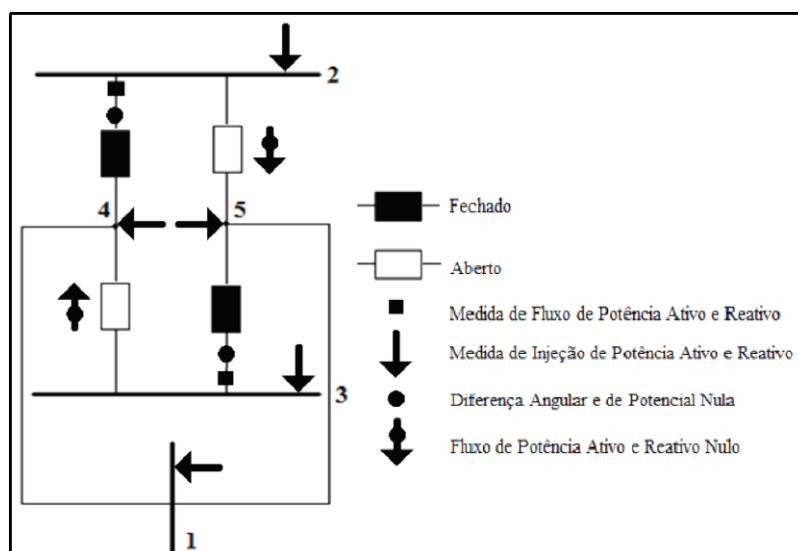
5.1 INTRODUÇÃO

O estimador de estados generalizado desacoplado proposto no Capítulo 4 foi implementado em MATLAB, considerando o modelo não linear da rede elétrica. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em simulações e testes com o programa desenvolvido. Um sistema teste de 5 barras, um de 24 barras (IEEE) e um com 30 barras (IEEE) foram escolhidos para ilustrar, avaliar e demonstrar a viabilidade da abordagem desenvolvida. Os resultados da estimação são obtidos considerando a matriz Jacobiana H constante. Esses resultados são comparados com os resultados do cálculo do fluxo de carga para os mesmos sistemas testes. A tolerância utilizada nas simulações foi de 10^{-3} .

5.2 SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS: EXEMPLO SIMBÓLICO

Este exemplo tem o objetivo de ilustrar as matrizes e procedimentos envolvidos na abordagem proposta.

FIGURA 2 – SISTEMA TESTE SIMBÓLICO.



FONTE: O autor (2016).

Considerando a abordagem desacoplada, o conjunto de medidas ilustradas na FIGURA 2, as novas variáveis de estado da modelagem no nível de subestação, as pseudomedidas operacionais relativas aos *status* dos disjuntores D_1 , D_2 , D_3 e D_4 , e as pseudomedidas estruturais de injeção nula nas barras 4 e 5, tem-se as seguintes matrizes H_{PP} e H_{QQ} :

$$H_{PP} = \begin{matrix} & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} \\ \begin{matrix} t_{14} \\ t_{15} \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ \theta_{24} \\ \theta_{35} \\ t_{25} \\ t_{34} \end{matrix} & \begin{bmatrix} * & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5.1)$$

$$H_{QQ} = \begin{matrix} & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\ \begin{matrix} u_{14} \\ u_{15} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ V_{24} \\ V_{35} \\ u_{25} \\ u_{34} \end{matrix} & \begin{bmatrix} * & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ * & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ * & 0 & 0 & 0 & * & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5.2)$$

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

As matrizes G_{PP} e G_{QQ} podem ser obtidas a partir de (4.22) e o algoritmo tradicional pode ser aplicado para obtenção dos estados da rede, que incluem os fluxos de potência ativa (reativa), juntamente com os ângulos (magnitudes) das

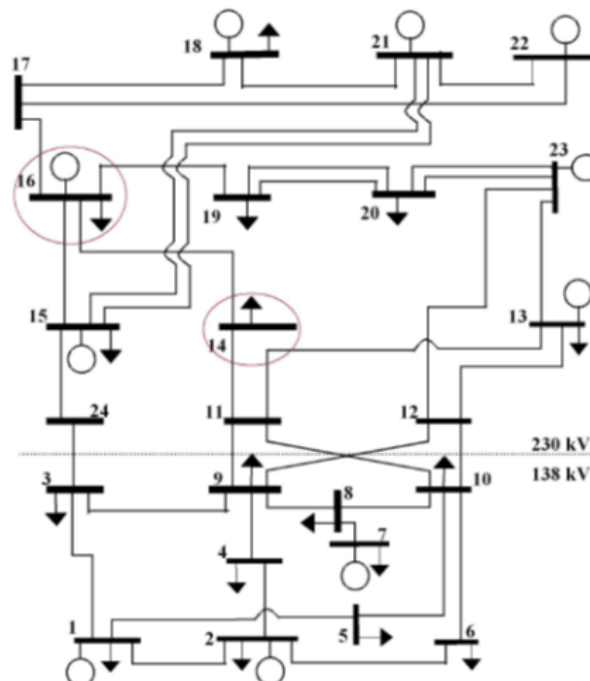
tensões a partir da resolução do problema ativo (reativo) do estimador de estados desacoplado no nível de subestação.

O algoritmo tradicional, encontrado em Abur; Gómez-Expósito (2004), 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.

5.3 SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS

A partir da formulação proposta neste trabalho, desenvolveu-se um programa computacional em MATLAB e primeiramente foi utilizado o Sistema Teste IEEE 24 barras, como mostra a FIGURA 3.

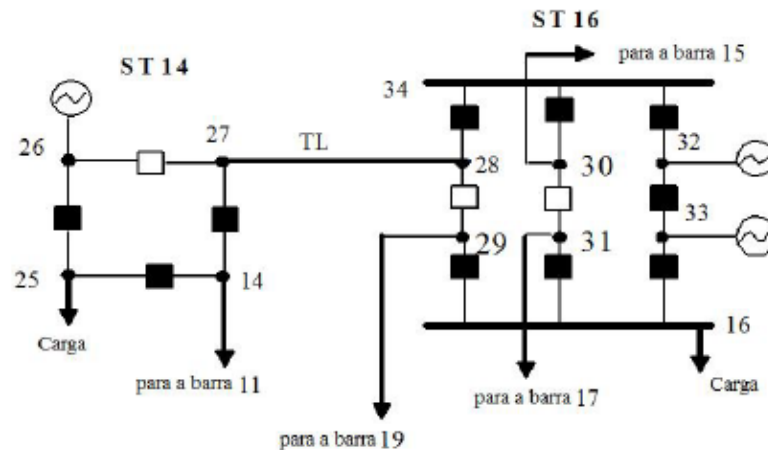
FIGURA 3 – SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS.



Fonte – IEEE.

Para este sistema, as barras 14 e 16 foram modeladas no nível de seção de barras, passando o sistema a conter 34 barras e 47 ramos, sendo 13 ramos chaveáveis, conforme apresentado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 14 E 16 DO SISTEMA TESTE IEEE 24 BARRAS.



Fonte – IEEE.

Os dados estimados do sistema, isto é, o módulo e ângulo das tensões nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores foram obtidos em *0,770249 segundos*, com *4 iterações*.

Para validar os resultados obtidos, foi executado um fluxo de carga estendido proposto em Lourenço, Silva e Simões Costa (2009) para o mesmo sistema teste, considerando a mesma representação e condição de operação para as subestações 14 e 16. Os resultados foram obtidos em *0,0742356 segundos* e em *4 iterações*.

A TABELA 1 mostra os valores estimados e calculados pelo fluxo de carga das tensões internas das subestações 14 e 16.

TABELA 1- VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SEs

continua

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | | |
| 1 | 1,035 | 0 | 1,035 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,035 | 0,186 | 1,035 | 0,1861 | 0 | 1E-04 |
| 3 | 0,969 | 5,247 | 0,9685 | 5,2464 | 0,0005 | 0,0006 |

TABELA 1 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SEs

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | | |
| 4 | 0,988 | -0,637 | 0,9878 | -0,6365 | 0,0002 | 0,0005 |
| 5 | 1,025 | -1,405 | 1,0252 | -1,4053 | 0,0002 | 0,0003 |
| 6 | 1,074 | -3,559 | 1,0739 | -3,5495 | 1E-04 | 0,0095 |
| 7 | 1,025 | 2,724 | 1,025 | 2,7228 | 0 | 0,0012 |
| 8 | 0,992 | -0,997 | 0,9916 | -0,9966 | 0,0004 | 0,0004 |
| 9 | 0,984 | 2,992 | 0,9838 | 2,9924 | 0,0002 | 0,0004 |
| 10 | 1,042 | 0,358 | 1,0416 | 0,3585 | 0,0004 | 0,0005 |
| 11 | 0,996 | 8,349 | 0,9964 | 8,3481 | 0,0004 | 0,0009 |
| 12 | 1,006 | 9,415 | 1,0061 | 9,4133 | 1E-04 | 0,0017 |
| 13 | 1,02 | 9,521 | 1,02 | 9,5191 | 0 | 0,0019 |
| 14 | 0,98 | 14,286 | 0,98 | 14,2839 | 0 | 0,0021 |
| 15 | 1,014 | 24,781 | 1,014 | 24,7786 | 0 | 0,0024 |
| 16 | 1,017 | 23,905 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0036 |
| 17 | 1,039 | 28,302 | 1,0386 | 28,2978 | 0,0004 | 0,0042 |
| 18 | 1,05 | 29,622 | 1,05 | 29,6182 | 0 | 0,0038 |
| 19 | 1,022 | 23,591 | 1,0221 | 23,5859 | 1E-04 | 0,0051 |
| 20 | 1,037 | 25,221 | 1,0374 | 25,2149 | 0,0004 | 0,0061 |
| 21 | 1,05 | 30,414 | 1,05 | 30,4096 | 0 | 0,0044 |
| 22 | 1,05 | 36,093 | 1,05 | 36,0871 | 0 | 0,0059 |
| 23 | 1,05 | 26,801 | 1,05 | 26,7936 | 0 | 0,0074 |
| 24 | 0,977 | 17,592 | 0,9768 | 17,5909 | 0,0002 | 0,0011 |
| 25 | 0,98 | 14,286 | 0,98 | 14,2839 | 0 | 0,0021 |
| 26 | 0,98 | 14,286 | 0,98 | 14,2839 | 0 | 0,0021 |
| 27 | 0,98 | 14,286 | 0,98 | 14,2839 | 0 | 0,0021 |
| 28 | 1,017 | 23,904 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0026 |
| 29 | 1,017 | 23,907 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0056 |
| 30 | 1,017 | 23,904 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0026 |
| 31 | 1,017 | 23,904 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0026 |
| 32 | 1,017 | 23,905 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0036 |
| 33 | 1,017 | 23,905 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0036 |
| 34 | 1,017 | 23,904 | 1,017 | 23,9014 | 0 | 0,0026 |

FONTE: O autor (2016)

Em relação à subestação 14, tem-se que os dados estimados para as barras 25, 26 e 27 são aproximadamente os mesmos da barra 14, indicando que os

disjuntores presentes entre essas barras e a barra 14 estão fechados, conforme pode ser observado na FIGURA 4, o que confirma a validade dos valores estimados. Da mesma forma, referente à subestação 16, nas barras 28, 29, 30, 31, 32, 33 e 34 são encontrados os mesmos valores de tensão e ângulo, conforme mostra a FIGURA 4.

As estimativas e o cálculo pelo fluxo de carga dos fluxos de potência ativa e reativa através dos disjuntores são apresentados na TABELA 2. Observa-se que o fluxo de potência ativa e reativo nos disjuntores abertos de ambas as subestações são nulos, como esperado. Já em relação aos fechados, observa-se que há fluxo de potência fluindo nos disjuntores.

TABELA 2 - FLUXO DE POTÊNCIA NOS DISJUNTORES

| DISJUNTOR | FLUXO ATIVO(MW) | FLUXO REATIVO(Mvar) | FLUXO ATIVO P_{km} (MW) | FLUXO REATIVO Q_{km} (Mvar) | ERRO (MW) | ERRO (Mvar) |
|-----------|-----------------|---------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| 14-25 | 194,005 | 66,407 | 194 | 66,411 | 0,005 | 0,004 |
| 14-27 | -428,325 | -6,08 | -428,325 | -6,077 | 0 | 0,003 |
| 25-26 | 0,002 | 27,409 | 0 | 27,411 | 0,002 | 0,002 |
| 26-27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16-29 | 21,496 | -27,772 | 21,496 | -27,771 | 0 | 0,001 |
| 16-31 | -316,764 | -35,307 | -316,761 | -35,312 | 0,003 | 0,005 |
| 16-33 | 195,26 | 43,08 | 195,265 | 43,083 | 0,005 | 0,003 |
| 28-29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28-34 | -437,871 | -72,232 | -437,877 | -72,23 | 0,006 | 0,002 |
| 30-31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30-34 | 87,511 | -27,579 | 87,512 | -27,58 | 0,001 | 0,001 |
| 32-33 | -272,814 | -71,445 | -272,815 | -71,446 | 0,001 | 0,001 |
| 32-34 | 350,362 | 99,81 | 350,365 | 99,81 | 0,003 | 0 |

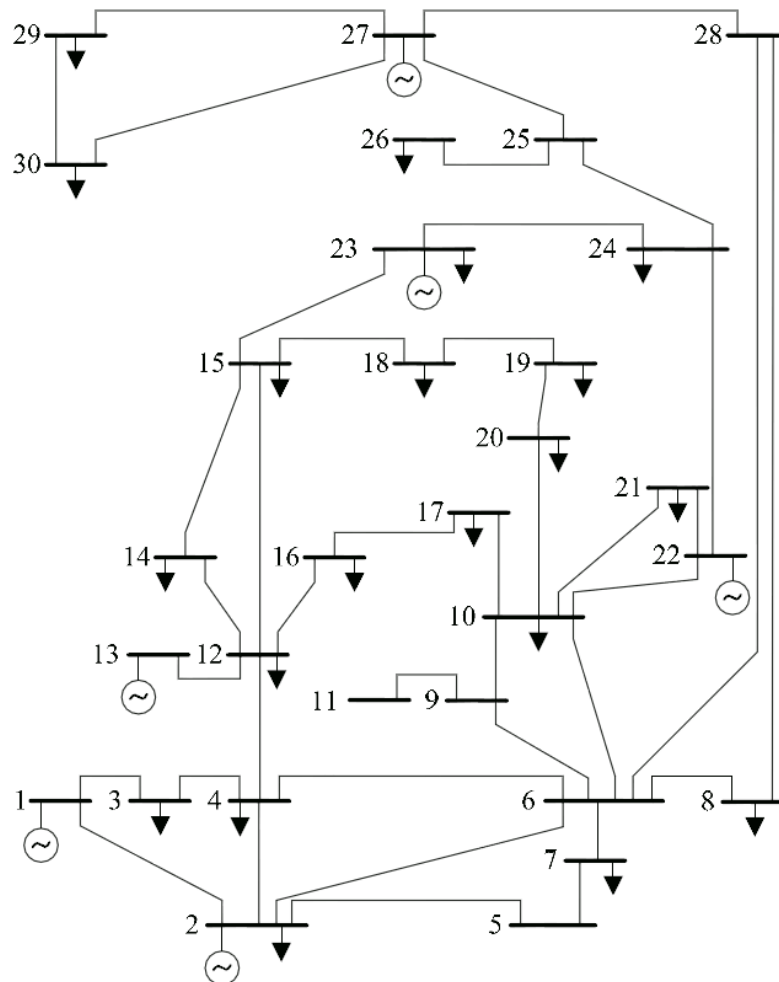
FONTE: O autor (2016)

Observa-se que os resultados da estimação de estados generalizada desacoplada proposta são semelhantes aos resultados do fluxo de carga, mesmo considerando a matriz Jacobiana H constante no processo de estimação. Estes resultados demonstram a viabilidade da aplicação das técnicas de desacoplamento ao processo de estimação de estados generalizada proposto nesse trabalho.

5.4 SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS

Para este sistema teste, ilustrado na FIGURA 5, consideram-se dois casos, adotando-se chaveamentos diferentes de disjuntores para cada um deles. Foram modeladas as barras 12 e 15 no nível de seção de barras, como adotado em outras referências, por exemplo em Clements; Simões Costa (1998) e Lourenço *et al.* (2006), passando o sistema a conter 41 barras e 59 ramos, sendo 18 ramos chaveáveis.

FIGURA 5 – SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS.

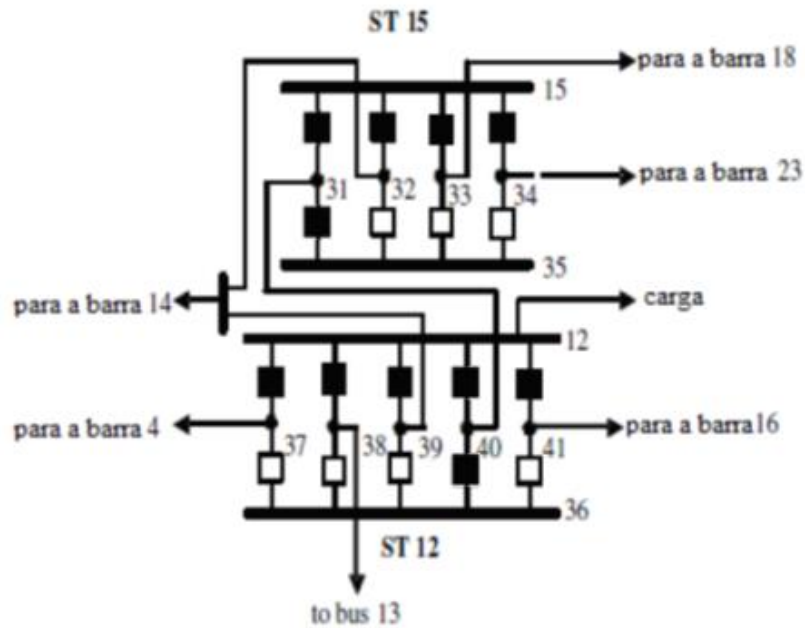


Fonte – IEEE.

- Caso 1

No primeiro caso, a configuração adotada para os *status* dos disjuntores é apresentada na FIGURA 6.

FIGURA 6 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 12 E 15 DO SISTEMA TESTE IEEE 30 BARRAS – CASO 1.



Fonte – IEEE.

Da mesma maneira que para o sistema teste de 24 barras, foram estimados e calculados pelo fluxo de carga o módulo, o ângulo das tensões nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores, em *0,91509 segundos*, com *7,5 iterações* e em *0,0740152 segundos* e em *7 iterações*, respectivamente. A TABELA 3 mostra os valores estimados e calculados pelo fluxo de carga das tensões internas das subestações 12 e 15.

TABELA 3 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SES

continua

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | | |
| 1 | 1,06 | 0 | 1,06 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,043 | -5,015 | 1,043 | -5,0145 | 0 | 0,0005 |
| 3 | 1,014 | -8,73 | 1,0138 | -8,7305 | 0,0002 | 0,0005 |
| 4 | 1,004 | -10,785 | 1,0038 | -10,7859 | 0,0002 | 0,0009 |
| 5 | 1,01 | -14,582 | 1,01 | -14,582 | 0 | 0 |
| 6 | 1,006 | -12,172 | 1,0055 | -12,1723 | 0,0005 | 0,0003 |

TABELA 3 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SEs

continua

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | | |
| 7 | 1 | -13,692 | 0,9995 | -13,6919 | 0,0005 | 1E-04 |
| 8 | 1,01 | -13,006 | 1,01 | -13,0061 | 0 | 1E-04 |
| 9 | 1,018 | -15,496 | 1,0177 | -15,4964 | 0,0003 | 0,0004 |
| 10 | 0,992 | -17,278 | 0,9916 | -17,2783 | 0,0004 | 0,0003 |
| 11 | 1,082 | -15,496 | 1,082 | -15,4964 | 0 | 0,0004 |
| 12 | 1,017 | -16,984 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,003 |
| 13 | 1,071 | -16,984 | 1,071 | -16,987 | 0 | 0,003 |
| 14 | 0,998 | -17,843 | 0,9973 | -17,8645 | 0,0007 | 0,0215 |
| 15 | 0,989 | -17,778 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0058 |
| 16 | 0,999 | -17,368 | 0,9986 | -17,3683 | 0,0004 | 0,0003 |
| 17 | 0,988 | -17,555 | 0,9884 | -17,5548 | 0,0004 | 0,0002 |
| 18 | 0,965 | -18,04 | 0,965 | -18,0386 | 0 | 0,0014 |
| 19 | 0,965 | -18,298 | 0,9651 | -18,2973 | 1E-04 | 0,0007 |
| 20 | 0,971 | -18,109 | 0,9709 | -18,1086 | 1E-04 | 0,0004 |
| 21 | 0,978 | -17,754 | 0,978 | -17,7541 | 0 | 1E-04 |
| 22 | 0,978 | -17,733 | 0,9784 | -17,7325 | 0,0004 | 0,0005 |
| 23 | 0,974 | -18,059 | 0,9745 | -18,0565 | 0,0005 | 0,0025 |
| 24 | 0,964 | -18,054 | 0,9642 | -18,0529 | 0,0002 | 0,0011 |
| 25 | 0,966 | -17,668 | 0,9665 | -17,6676 | 0,0005 | 0,0004 |
| 26 | 0,948 | -18,134 | 0,9479 | -18,1335 | 1E-04 | 0,0005 |
| 27 | 0,977 | -17,137 | 0,9769 | -17,1365 | 1E-04 | 0,0005 |
| 28 | 1,002 | -12,817 | 1,0021 | -12,8173 | 1E-04 | 0,0003 |
| 29 | 0,956 | -18,489 | 0,9561 | -18,4885 | 1E-04 | 0,0005 |
| 30 | 0,944 | -19,462 | 0,944 | -19,4621 | 0 | 1E-04 |
| 31 | 0,989 | -17,774 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0018 |
| 32 | 0,989 | -17,786 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0138 |
| 33 | 0,989 | -17,775 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0028 |
| 34 | 0,989 | -17,776 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0038 |
| 35 | 0,989 | -17,774 | 0,9888 | -17,7722 | 0,0002 | 0,0018 |
| 36 | 1,017 | -16,988 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,001 |
| 37 | 1,017 | -16,987 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0 |
| 38 | 1,017 | -16,984 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,003 |
| 39 | 1,017 | -16,975 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,012 |
| 40 | 1,017 | -16,988 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,001 |

TABELA 3 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SEs

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | | |
| 41 | 1,017 | -16,986 | 1,0172 | -16,987 | 0,0002 | 0,001 |

conclusão

FONTE: O autor (2016)

Com relação à subestação 12, os dados estimados para as barras 36, 37, 38, 39, 40 e 41 foram os mesmos da barra 12, e conforme pode-se observar na FIGURA 6, os disjuntores presentes entre essas barras e a barra 12 estão fechados, justificando o resultado obtido. A mesma observação pode ser feita para a subestação 15. Segundo a FIGURA 6, os disjuntores situados entre a barra 15 e as barras 31, 32, 33, 34 e 35 estão fechados, não havendo diferença de potencial entre elas em módulo ou ângulo.

Os fluxos de potência ativa e reativa estimados e calculados pelo fluxo de carga através dos disjuntores encontram-se na TABELA 4. Para a subestação 12, observa-se claramente que o fluxo de potência ativo e reativo em disjuntores abertos (36-37, 36-38, 39-36 e 36-41) são nulos, como esperado. Já em relação aos disjuntores fechados, observa-se que há fluxo de potência entre os disjuntores. A mesma observação se estende à subestação 15.

TABELA 4 - FLUXO DE POTÊNCIA NOS DISJUNTORES

| DISJUNTOR | FLUXO ATIVO(MW) | FLUXO REATIVO (Mvar) | FLUXO ATIVO P_{km} (MW) | FLUXO REATIVO Q_{km} (Mvar) | ERRO | |
|-----------|-----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-------|--------|
| | | | | | (MW) | (Mvar) |
| 15-31 | -17,07 | -2,808 | -17,062 | -12,789 | 0,008 | 9,981 |
| 15-32 | -1,705 | -2,235 | -1,726 | -2,279 | 0,021 | 0,044 |
| 15-33 | 5,895 | 7,872 | 5,901 | 7,882 | 0,006 | 0,01 |
| 15-34 | 4,681 | 4,677 | 4,687 | 4,686 | 0,006 | 0,009 |
| 31-35 | -0,001 | -0,006 | 0 | 0 | 0,001 | 0,006 |
| 32-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-37 | -43,086 | 7,656 | -43,083 | 7,652 | 0,003 | 0,004 |
| 12-38 | 0,002 | -39,095 | 0 | -39,099 | 0,002 | 0,004 |

continua

TABELA 4 - FLUXO DE POTÊNCIA NOS DISJUNTORES

| DISJUNTOR | conclusão | | | | | |
|-----------|-----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| | FLUXO ATIVO(MW) | FLUXO REATIVO (Mvar) | FLUXO ATIVO P_{km} (MW) | FLUXO REATIVO Q_{km} (Mvar) | ERRO (MW) | ERRO (Mvar) |
| 12-39 | 8,026 | 4,068 | 8,042 | 4,097 | 0,016 | 0,029 |
| 12-40 | 17,379 | 13,409 | 17,37 | 13,396 | 0,009 | 0,013 |
| 12-41 | 6,477 | 6,458 | 6,472 | 6,454 | 0,005 | 0,004 |
| 36-37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-40 | -0,002 | -0,003 | 0 | 0 | 0,002 | 0,003 |
| 36-41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

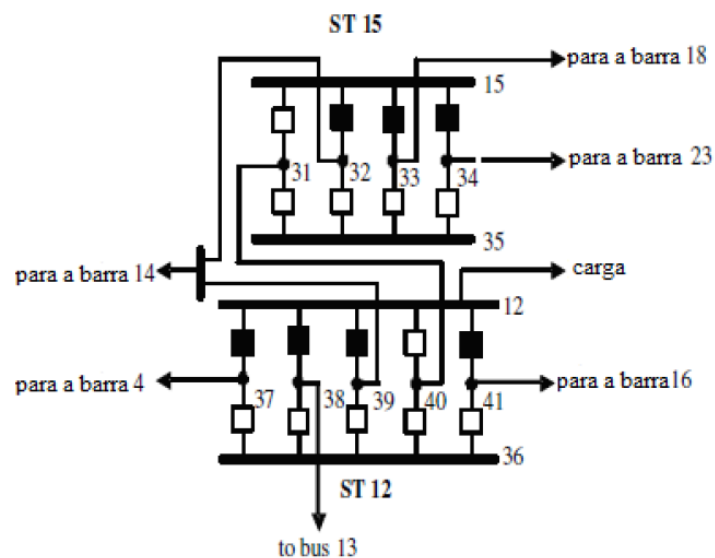
FONTE: O autor (2016)

Mais uma vez, pode-se inferir que os resultados estimados são muito próximos dos resultados do fluxo de carga.

- Caso 2

No segundo caso, a configuração adotada para os *status* dos disjuntores é apresentada na FIGURA 7.

FIGURA 7 – MODELAGEM NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO PARA AS BARRAS 12 E 15 DO SISTEMA TESTE 30 BARRAS – CASO 2.



Fonte – IEEE.

A solução da estimação foi obtida em *0,755777 segundos*, com *8,5 iterações*, sendo 9 ativas e 8 reativas. A solução do fluxo de carga foi obtida em em *0,0824621 segundos* e em *7 iterações*. A TABELA 5 mostra os valores estimados e calculados pelo fluxo de carga das tensões internas das subestações 12 e 15.

TABELA 5 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SES

continua

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|--------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) | | |
| 1 | 1,06 | 0 | 1,06 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1,043 | -5,044 | 1,043 | -5,0442 | 0 | 0,0002 |
| 3 | 1,014 | -8,746 | 1,0141 | -8,7465 | 1E-04 | 0,0005 |
| 4 | 1,004 | -10,804 | 1,0041 | -10,8054 | 1E-04 | 0,0014 |
| 5 | 1,01 | -14,648 | 1,01 | -14,6481 | 0 | 1E-04 |
| 6 | 1,005 | -12,253 | 1,0046 | -12,2537 | 0,0004 | 0,0007 |
| 7 | 0,999 | -13,767 | 0,9989 | -13,7673 | 1E-04 | 0,0003 |
| 8 | 1,01 | -13,111 | 1,01 | -13,1115 | 0 | 0,0005 |
| 9 | 1,012 | -15,808 | 1,0123 | -15,8082 | 0,0003 | 0,0002 |
| 10 | 0,981 | -17,732 | 0,9811 | -17,7321 | 1E-04 | 1E-04 |
| 11 | 1,082 | -15,808 | 1,082 | -15,8082 | 0 | 0,0002 |
| 12 | 1,023 | -16,512 | 1,023 | -16,5156 | 0 | 0,0036 |
| 13 | 1,071 | -16,512 | 1,071 | -16,5156 | 0 | 0,0036 |
| 14 | 0,978 | -18,475 | 0,9779 | -18,4915 | 1E-04 | 0,0165 |
| 15 | 0,938 | -18,96 | 0,938 | -18,9542 | 0 | 0,0058 |
| 16 | 0,997 | -17,252 | 0,9967 | -17,2523 | 0,0003 | 0,0003 |
| 17 | 0,981 | -17,843 | 0,9808 | -17,8436 | 0,0002 | 0,0006 |
| 18 | 0,928 | -18,994 | 0,9275 | -18,9923 | 0,0005 | 0,0017 |
| 19 | 0,936 | -19,121 | 0,936 | -19,1204 | 0 | 0,0006 |
| 20 | 0,946 | -18,845 | 0,9464 | -18,8448 | 0,0004 | 0,0002 |
| 21 | 0,965 | -18,258 | 0,9655 | -18,2582 | 0,0005 | 0,0002 |
| 22 | 0,965 | -18,248 | 0,9653 | -18,2479 | 0,0003 | 1E-04 |
| 23 | 0,936 | -19,023 | 0,9361 | -19,0216 | 1E-04 | 0,0014 |
| 24 | 0,943 | -18,689 | 0,9427 | -18,6879 | 0,0003 | 0,0011 |
| 25 | 0,953 | -18,204 | 0,9526 | -18,2035 | 0,0004 | 0,0005 |
| 26 | 0,934 | -18,683 | 0,9337 | -18,6833 | 0,0003 | 0,0003 |
| 27 | 0,968 | -17,598 | 0,968 | -17,5978 | 0 | 0,0002 |
| 28 | 1 | -12,924 | 1,0003 | -12,9248 | 0,0003 | 0,0008 |
| 29 | 0,947 | -18,975 | 0,9469 | -18,9755 | 1E-04 | 0,0005 |

TABELA 5 - VALORES ESTIMADOS E CALCULADOS PELO FLUXO DE CARGA DAS TENSÕES COMPLEXAS NAS SEÇÕES DE BARRA DAS SES

| BARRA | Estimação | | Fluxo de Carga | | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) |
|-------|-----------|----------------|----------------|--------------|----------|--------------|
| | TENSÃO(V) | ÂNGULO (GRAUS) | ERRO (V) | ERRO (GRAUS) | | |
| 30 | 0,935 | -19,968 | 0,9347 | -19,9683 | 0,0003 | 0,0003 |
| 31 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 32 | 0,938 | -18,966 | 0,938 | -18,9542 | 0 | 0,0118 |
| 33 | 0,938 | -18,957 | 0,938 | -18,9542 | 0 | 0,0028 |
| 34 | 0,938 | -18,957 | 0,938 | -18,9542 | 0 | 0,0028 |
| 35 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 1,023 | -16,515 | 1,023 | -16,5156 | 0 | 0,0006 |
| 38 | 1,023 | -16,512 | 1,023 | -16,5156 | 0 | 0,0036 |
| 39 | 1,023 | -16,506 | 1,023 | -16,5156 | 0 | 0,0096 |
| 40 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 1,023 | -16,514 | 1,023 | -16,5156 | 0 | 0,0016 |

FONTE: O autor (2016)

Os dados estimados para as barras 37, 38, 39 e 41 da subestação 12 foram os mesmos da barra 12, e de acordo com a FIGURA 7, os disjuntores presentes entre essas barras e a barra 12 estão fechados, justificando o resultado da simulação. 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. De acordo com a FIGURA 7, os disjuntores situados entre a barra 15 e as barras 32, 33 e 34 estão fechados, não havendo diferença dos valores estimados. Já os disjuntores encontrados entre as barras 31 e 35 e a barra 15 encontram-se abertos.

Os valores encontrados para os fluxos de potência ativa e reativa através dos disjuntores são apresentados na TABELA 6. Observa-se na subestação 12 que o fluxo de potência ativo e reativo em disjuntores abertos (36-37 a 41 e 12-40) são nulos. Os disjuntores fechados (12-37, 12-38, 12-39 e 12-41) apresentam fluxo de potência. A mesma observação é feita para a subestação 15.

TABELA 6 - FLUXO DE POTÊNCIA NOS DISJUNTORES

| DISJUNTOR | FLUXO ATIVO(MW) | FLUXO REATIVO (Mvar) | FLUXO ATIVO P_{km} (MW) | FLUXO REATIVO Q_{km} (Mvar) | ERRO (MW) | ERRO (Mvar) |
|-----------|-----------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| 15-31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15-32 | -10,972 | -6,562 | -10,972 | -6,562 | 0 | 0 |
| 15-33 | 2,003 | 3,541 | 2,003 | 3,541 | 0 | 0 |
| 15-34 | 0,769 | 0,521 | 0,769 | 0,521 | 0 | 0 |
| 31-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 32-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 33-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 34-35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-37 | -39,923 | 9,531 | -39,923 | 9,521 | 0 | 0,01 |
| 12-38 | 0 | 35,105 | 0 | -35,094 | 0 | 70,199 |
| 12-39 | 18,075 | 9,556 | 18,075 | 9,555 | 0 | 0,001 |
| 12-40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12-41 | 10,648 | 8,518 | 10,649 | 8,518 | 0,001 | 0 |
| 36-37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36-41 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

FONTE: O autor (2016)

Observa-se que os resultados da estimação comparados com os resultados do fluxo de carga são equivalentes, ou seja, os resultados do fluxo de carga reforçam a validade do método proposto.

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).

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os resultados apresentados demonstram que o desacoplamento do estimador de estados generalizado é possível e vantajoso. Os estados foram estimados de forma correta e permaneceram condizentes com a proposta.

Ressalta-se que com o desacoplamento, a performance computacional é visivelmente melhorada, devido à aplicação de matrizes constantes ao método. Como na EEG as variáveis de estados aumentam, bem como são incluídas pseudomedidas, este estimador tende a ser mais lento para obter a solução do problema se comparado com o cálculo do fluxo de carga.

Desta maneira, pode-se observar que a aplicação do método desacoplado rápido para o estimador de estados generalizado é eficiente e passível de utilização nos centros de controle do sistema elétrico.

6 CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho 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, por exemplo, ou ainda sendo utilizada de forma aliada à essas técnicas. Dessa forma, a EEG se apresenta como uma alternativa atraente para viabilizar sua aplicação à operação em tempo real.

A estrutura da matriz Jacobiana do estimador de estados generalizado proposto é ilustrada através de um exemplo simbólico, enquanto resultados de simulações com os sistemas IEEE 24 e 30 barras comprovam a eficácia da metodologia proposta.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos realizados para o desenvolvimento deste trabalho, novos trabalhos podem ser sugeridos, como:

- Aplicar o estimador de estados generalizado desacoplado em sistemas de distribuição;
- Incluir a detecção e identificação de erros no processo de estimação de estados generalizada desacoplada;
- Realizar testes da técnica desenvolvida em sistemas reais.

- Estudar e verificar vantagens da estimação de estados generalizada desacoplada com relação à estimação de estados generalizada em dois estágios.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A.; ÇELIK, M.; KIM, H. Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 4, p. 2029–2037, 1995.
- ABUR, Ali; GÓMEZ EXPÓSITO, Antonio. **Power system state estimation: theory and implementation**. New York, NY: CRC Press, Taylor & Francis, 2004. 327 p.
- ALSAÇ, O.; STOTT, B. Fast Decoupled Load Flow. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 93, p. 859-869, mai. 1974.
- ALSAÇ, O.; VEMPATI, N.; SCOTT, B. MONTICELLI, A. Generalized State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 3, p. 1069-1075, ago. 1998.
- CLEMENTS, K. A.; SIMÕES COSTA, Antônio J. A.. Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 2, p. 3347-353, mai. 1998.
- COELHO, Elizandra P. R. **Processamento Simultâneo de Erros na Estimação de Estados Generalizada**. Curitiba, PR: Editora UFPR, 2012. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2012.
- COELHO, Thiago C. **Determinação da Região de Impacto de Erros de Topologia via Multiplicadores de Lagrange Normalizados**. Curitiba, PR: Editora UFPR, 2007. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2007.
- COLZANI, L. **Determinação de Sub-Redes Relevantes para Identificação de Erros Topológicos em Sistemas de Potência**. Florianópolis, SC: Editora UFSC, 2001. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- JAÉN, A.; GÓMEZ-EXPÓSITO, A. Implicitly Constrained Substation Model for State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 3, p. 850–856, ago. 2002.
- GARCIA, A.; MONTICELLI, A.; ABREU, P. Fast Decoupled State Estimator and Bad Data Processing. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 98, n. 5, p. 1645-1652, out. 1979.
- GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's Augmented Matriz Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 11, p. 2987-2991, nov. 1985.
- HORISBERGER, H. P.; RICHARD, J. C.; ROSSIER, C. A Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-95, n. 1, p. 208-215, 1976.

LO, K. L.; MAHMOUD, Y. M. A Decoupled Linear Programming Technique for Power System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. PWRS-1, n. 1, p. 154-160, fev. 1986.

LOURENÇO, Elizete M. **Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada**. Florianópolis, SC: Editora UFSC, 2001. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

LOURENÇO, Elizete; SIMÕES COSTA, Antônio J. A.; CLEMENTS, Kevin A.; CERNEV, Rafael A. A Topology Error Identification Method Directly Based on Collinearity Tests. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, p. 1920-1929, jun. 2006.

LOURENÇO, Elizete; SILVA, Nastasha S. da; SIMÕES COSTA, Antônio J. Fast Decoupled Steady-State Solution for Power Networks Modeled at the Bus Section Level. **IEEE Bucharest Power Tech Conference**, jun. 2009.

MAZI, A. A.; Wollenberg, B. F.; Hesse, M. H. (1986). Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, n. 3: p. 258–264, 1986.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Fast Decoupled State Estimator. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 2, p. 556–564, mai. 1990.

MONTICELLI, A; GARCIA, A. Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 6, n. 4, nov. 1991.

MONTICELLI, A. The Impact of Modeling Short Circuit Branches in State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 1, p. 364–370, fev. 1993b.

MONTICELLI, A. Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, ago. 1993a.

MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems - A Generalized Approach**. 1999. 394 p.

MONTICELLI, A. Electric power system state estimation. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, n. 2, p. 262–282, 2000.

NOGUEIRA, Ellen Mara M. **Normalização Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição Emergentes**. Curitiba, PR: Editora UFPR, 2014. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2014.

SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B. Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 1, p. 125–130, 1970.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 1, p. 120–125, 1970.

SIMÕES COSTA, Antônio J. A. **Apostila: A Estimação de Estados via Método da Matriz Aumentada**. Florianópolis, 1998 a. Disponível em: <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/assp/assp5.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2016.