

Determinação de conjuntos críticos de medidas em planos de medição usados para a estimação de estados em sistemas de potência

A. Simões Costa ^a

^a*Universidade Federal de Santa Catarina, CTC / EEL / LABSPOT /
Florianópolis (88040-900)SC, Brazil
Emails: simoes@labspot.ufsc.br*

Resumo

A presença de medidas e/ou conjuntos críticos em planos de medição submetidos a um estimador de estados de sistemas de potência pode comprometer seriamente o desempenho das funções ligadas ao processamento de erros grosseiros. É, portanto, essencial se dispor de meios de detectar tais medidas de modo que, na operação em tempo real, o operador possa utilizar esta informação para melhor julgar os resultados das rotinas de detecção/identificação de medidas espúrias. No estágio de projeto “off-line” de planos de medição, é igualmente importante o uso de ferramentas que alertem para a presença de medidas com alto grau de criticalidade.

Este trabalho ¹ apresenta um método topológico para a determinação de medidas e conjuntos críticos, baseado em um algoritmo de análise da observabilidade previamente proposto. O método é aplicado a sistemas-teste que vêm sendo utilizados na literatura em estudos de observabilidade e processamento de erros grosseiros, o que fornece um meio adicional de validação dos resultados.

1 Introdução

Um dos atributos que tornam a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) a técnica mais adequada para a monitoração em tempo real de sistemas de potência é a sua capacidade de detectar e identificar a presença de erros grosseiros (EGs) no conjunto de medidas submetidas ao estimador. O processamento de EGs é possível graças ao aproveitamento da redundância disponível no plano de medição,

¹ Baseado em *Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas em Planos de Medição usados na Estimação de Estados em Sistemas de Potência*, Anais do VII Congresso Brasileiro de Automática, 1988, pp. 830-836

tendo por base propriedades estatísticas bem definidas associadas aos resíduos de estimação ou a funções destas quantidades [1,2].

O bom desempenho das funções que realizam o processamento de EGs pressupõe portanto a disponibilidade de um nível adequado de redundância. Não se trata aqui de assegurar apenas um valor razoável de redundância global para o sistema (definida como (número total de medidas)/(número de variáveis de estado a estimar)). O que de fato importa é se dispor de uma certa redundância individual para as medidas. No caso-limite da não-existência de redundância para uma determinada medida, esta será crítica, isto é, a sua eliminação do plano de medição inviabiliza a estimação de estados por tornar o sistema não-observável. No contexto do processamento de EGs, o que há de interessante acerca de medidas críticas é que erros nestas medidas são não-detectáveis [3].

O caso que se segue em grau de criticalidade corresponde à situação em que há apenas uma medida redundante com a medida considerada. Há então a possibilidade de as duas medidas formarem um par crítico: a eliminação de qualquer uma delas torna crítica a outra medida. Neste caso, é possível se mostrar que, embora um erro em uma das medidas possa ser detectado, a medida portadora de EG não pode ser identificada, já que os resíduos de estimação normalizados associados a ambas são iguais [2]. A noção de par crítico pode ser generalizada para a de conjunto crítico. A remoção de qualquer medida de um conjunto crítico que contém várias medidas torna todas as demais críticas. As medidas pertencentes a estes conjuntos apresentam resíduos normalizados iguais, de modo que um EG em qualquer delas é não-identificável, embora seja detectável (ver Réplica dos Autores às discussões de [2]).

Em razão das características de não-detectabilidade e não-identificabilidade de medidas e conjuntos críticos, respectivamente, é importante que se disponha de meios para determinar a sua presença entre as medidas a serem processadas pelo estimador. Mais especificamente, pode-se dizer que procedimentos deste tipo encontram dois tipos de aplicação:

- (1) No projeto “off-line” de planos de medição para EESP, em que o projetista deve se assegurar de que um EG em qualquer medida pode ser prontamente detectado e identificado,
- (2) Na operação “on-line” do estimador de estados em que, face à possibilidade de variações dinâmicas no número de medidas por motivo de defeitos em medidores, sistema de telemetria, etc., o operador deve ser informado da presença de observações que, se sujeitas a erro, não poderão ser detectadas e/ou identificadas.

O problema de se associar o reconhecimento de conjuntos críticos ao processamento de EGs foi recentemente abordado por [4], que propõem dois algoritmos distintos com aquela finalidade. O primeiro tem caráter topológico, e é baseado a noção de conjuntos dependentes minimais. Quando o algoritmo combinatório de análise de

observabilidade de [5] é o utilizado (como aparentemente o é por Ayres e Haley em [4]), tais conjuntos podem ser obtidos em uma etapa de pós-processamento.

O segundo algoritmo apresentado em [4] é numérico, fundamentando-se em certas propriedades da submatriz da matriz de covariância dos resíduos associada às medidas de cada conjunto crítico.

O objetivo deste trabalho é propor métodos combinatórios para a identificação “a priori” de medidas e conjuntos críticos. Os métodos recorrem a execuções sucessivas do algoritmo para determinação da observabilidade topológica de [6]. Embora a experiência com este último tenha comprovado a sua eficiência computacional, o fato da rotina de observabilidade ser acionada repetidas vezes faz com que o método proposto preste-se melhor a aplicações “off-line”, como ferramenta auxiliar no projeto de planos de medição.

Este artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 2, faz-se uma revisão das técnicas para processamento de EGs. As definições e propriedades associadas a medidas e conjuntos críticos são apresentadas na Seção 3. A Seção 4 descreve o algoritmo proposto, sendo a sua aplicação aos sistemas-teste relatada na Seção 5. Finalmente, as considerações finais e perspectivas de futuros trabalhos são apresentadas na Seção 6.

2 Estimação de Estados e Processamento de Erros Grosseiros

2.1 Estimação de Estados

Considere um sistema de potência de N barras, em que são realizadas m medidas. O número de estados (módulos e ângulos das tensões nas barras) a estimar é denotado por n , e é igual a $2N - 1$. O modelo linearizado de medição é dado por [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{z} &= \mathbf{H}\Delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\eta} \\ E\{\boldsymbol{\eta}\} &= 0 \quad E\{\boldsymbol{\eta}\boldsymbol{\eta}^t\} = \mathbf{R} \end{aligned} \tag{1}$$

onde $\Delta\mathbf{z}$ é o vetor $m \times l$ de medidas incrementais, $\mathbf{H}(\cdot)$ é a matriz Jacobiana $m \times n$ do modelo de medição, \mathbf{x} é o vetor $n \times l$ de incrementos nos estados, $\boldsymbol{\eta}$ é o vetor $m \times 1$ dos erros de medição cuja matriz de covariância é \mathbf{R} , e $E\{\cdot\}$ é o operador expectância.

Pelo método dos mínimos quadrados ponderados, a estimativa de $\Delta\mathbf{x}$ é obtida minimizando-se

$$\mathbf{J}(\Delta\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{H}\Delta\mathbf{x}]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{H}\Delta\mathbf{x}] \tag{2}$$

Por conveniência, descartou-se o argumento de $\mathbf{H}(\cdot)$.

A estimativa do vetor de estados \mathbf{x} pode ser obtida através de um processo iterativo em que $\Delta\mathbf{x}$ é calculado a cada iteração resolvendo-se a equação normal:

$$\mathbf{G}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{H}^t\mathbf{R}^{-1}\mathbf{z} \quad (3)$$

onde

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}^t\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H} \quad (4)$$

é a matriz ganho.

2.2 Detecção de Erros Grosseiros

O método usual para detectar a presença de medidas contaminadas com EGs é o chamado teste $J(\hat{\mathbf{x}})$, que consiste em se comparar o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ dado pela Eq. (2) após a convergência com um limiar K obtido da distribuição do qui-quadrado com $(m - n)$ graus de liberdade, a partir da definição de uma dada probabilidade de falso alarme [1]:

$$K = X_{(m-n),\alpha} \quad (5)$$

O lado direito da Eq. (5) representa o percentil $100(1 - \alpha)$ da distribuição do qui-quadrado com $(m - n)$ graus de liberdade. Observe da Eq. (2) que $J(\hat{\mathbf{x}})$ pode ser interpretado como a soma ponderada dos quadrados dos resíduos de estimação, sendo os fatores de ponderação iguais aos inversos das respectivas variâncias dos erros de medição. Desta forma, para que uma medida espúria seja detectada, é necessário que pelo menos um resíduo seja afetado pelo EG nela contido.

Mais recentemente, Monticelli e Garcia, argumentando que o teste $J(\hat{\mathbf{x}})$ pode se tornar insensível para valores moderados de magnitudes de erro, propuseram um outro método a que deram o nome de *teste \hat{b}* , o qual consiste na comparação de uma estimativa \hat{b} para o erro associado ao maior resíduo normalizado (ver Subseção 2.3) com um limiar pré-estabelecido [1]. Como o erro estimado para uma dada medida é função do respectivo resíduo, aplica-se para este método a mesma observação já feita quanto aos efeitos dos EGs sobre os resíduos.

2.3 Identificação de Erros Grosseiros

A identificação de medidas espúrias cuja presença no plano de medição foi anteriormente detectada é em geral baseada no cálculo de resíduos normalizados. Pode-se demonstrar que, se a redundância é suficiente e se todas as demais medidas são perfeitas, então, a medida portadora de EG é aquela que apresenta o resíduo normalizado de maior valor absoluto (Monticelli e Garcia, 1983). O resíduo normalizado

para a medida i é definido como a relação entre o respectivo resíduo de estimação e o seu desvio padrão [1,2].

No caso da presença de múltiplos erros grosseiros, não se pode mais afirmar que as medidas errôneas correspondem os resíduos normalizados de maior módulo [2]. O método que tem apresentado melhores resultados para identificação de EGs múltiplos baseia-se em testes de hipóteses realizados sobre estimativas dos erros de um conjunto de medidas previamente selecionadas como suspeitas. A principal característica do método é que, no processo de obtenção das estimativas dos erros, os resíduos das medidas suspeitas são tratados coletivamente, de modo que as possíveis interações entre eles são adequadamente levadas em conta [2,8]. Por outro lado, uma limitação do método é o fato de que não pode ser selecionada como suspeita uma medida ou um conjunto de medidas cuja eliminação simultânea provoque a perda da observabilidade do sistema (isto é, reduza o posto da matriz Jacobiana \mathbf{H} e, conseqüentemente, o posto da matriz \mathbf{G} da Eq. (3)).

3 Medidas Críticas e Conjuntos Críticos: Definições, Propriedades e Efeitos Sobre o Processamento de Erros Grosseiros

Considere um sistema de potência observável com respeito a um dado plano de medição M . Uma medida contida em M é dita crítica se a sua perda torna o sistema não-observável. Em termos matemáticos, isto significa que a perda de uma medida crítica provoca a redução do posto da matriz Jacobiana \mathbf{H} de uma unidade (ver Eqs. (3) e (4)). Uma medida crítica contém assim a única informação sobre uma certa variável de estado, que em conseqüência não pode ser estimada se aquela medida não estiver disponível.

Define-se um conjunto crítico como um subconjunto de medidas de M tal que a perda de qualquer delas torna simultaneamente críticas as medidas restantes. No caso particular de um conjunto crítico formado por duas medidas tem sido usado o termo par crítico; um conjunto crítico composto por três medidas pode ser denominado trinca crítica ou terno crítico, etc.

As definições de medida e conjunto críticos podem ser vistas na realidade como casos particulares da noção mais geral de conjunto k -crítico. Diz-se que um subconjunto S de medidas de M é k -crítico, sendo k um número inteiro, se:

- a) Qualquer conjunto de k medidas escolhidas de S , se removido do plano de medição, deixa o sistema ainda observável;
- b) Existe um conjunto de $k + 1$ medidas pertencentes a S cuja remoção do plano de medição torna o sistema não-observável.

Assim, se S é formado por uma medida crítica, S é 0-crítico; se S é um conjunto

crítico, S é 1-crítico, etc. Neste trabalho, o interesse se concentra nos casos particulares de $k = 0$ e $k = 1$.

É possível se provar que o resíduo de estimação associado a uma medida crítica é necessariamente nulo [9], o que seria de se esperar, tendo em vista o fato de que não existe nenhuma observação redundante com este tipo de medida. À luz do que foi comentado na Subseção 2.2, conclui-se que EGs em medidas críticas são não-detectáveis, isto é, podem comprometer a correção de variáveis estimadas sem que seja possível detectá-los. Um problema correlato, mas que foge ao escopo deste artigo, é o da determinação das quantidades cujas estimativas seriam afetadas por uma medida crítica contaminada por EG [10].

Quanto aos conjuntos críticos, demonstra-se que os resíduos normalizados associados às medidas pertencentes a estes grupos são iguais entre si (ver réplica dos autores às discussões em [2]). Isto quer dizer que, embora a presença de um EG simples em uma medida de um conjunto crítico possa ser detectada (dependendo naturalmente da eficiência do método de detecção e da amplitude do erro), tal erro não poderá ser identificado no caso geral (a identificação correta poderá ocorrer fortuitamente, em função de fatores como ordenação das medidas, etc.). No caso de EGs múltiplos em medidas pertencentes a um conjunto crítico, a aplicação de métodos baseados em testes de hipóteses é igualmente inviabilizada, pelos motivos expostos no final da Subseção 2.3.

Para formalizar os conceitos acima, concernentes à identificação de EGs em medidas pertencentes a conjuntos críticos, [10] introduziu a definição de identificabilidade topológica:

Um conjunto de medidas é topologicamente identificável se a sua eliminação simultânea do plano de medição não provocar nem a perda da observabilidade do sistema nem a criação de novas medidas críticas.

O mesmo autor faz a conjectura de que uma condição necessária para que um grupo de medidas errôneas seja corretamente identificado é que o mesmo seja topologicamente identificável.

Antes de encerrar a seção, cabe fazer algumas observações a respeito da terminologia utilizada em trabalhos previamente publicados sobre o mesmo assunto. [5] adotam o termo “conjuntos dependentes minimais” (de conotação combinatória mais forte) com o mesmo significado dos conjuntos críticos utilizados neste trabalho, embora os mesmos autores refram-se em outros artigos a pares críticos. [4], por outro lado, utilizam o termo “Grupo de Erros Grosseiros” (“Bad Data Groups”) referindo-se a um conjunto de medidas cujos resíduos normalizados são iguais. Como se pode verificar, esta definição é interpretada neste trabalho como propriedade dos conjuntos críticos.

4 Um Método Para a Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos

4.1 Descrição Sucinta do Método Proposto

Técnicas para a identificação de medidas e conjuntos críticos podem ser concebidas tendo por base as propriedades dos resíduos associados a estas medidas, descritas na Seção 3. Assim, medidas críticas podem ser detectadas verificando-se se existem resíduos de estimação nulos (ou cujas variâncias são nulas, ver [8]). Conjuntos críticos, por outro lado, seriam identificados através da busca de grupos de medidas cujos resíduos normalizados são iguais.

Métodos desta natureza apresentam dificuldades inerentes ao fato de serem baseados em cálculos em ponto flutuante. Assim, para que se possa determinar corretamente as medidas críticas, é necessário que seja estabelecida uma tolerância adequada abaixo da qual se considera que os resíduos (ou suas variâncias) são nulos(as). No caso de conjuntos críticos, a tarefa se torna ainda mais complicada pelo fato de, na prática, os módulos dos resíduos normalizados de medidas pertencentes a estes conjuntos não serem exatamente iguais. Isto se deve não só às imprecisões do cálculo em ponto flutuante, mas também a outros fatores, como o acoplamento “residual” entre medidas ativas e reativas que sempre existe, etc. Acresça-se a isto o fato de que as diferenças entre os valores absolutos de tais resíduos normalizados podem variar em função da condição de operação para o qual são calculados.

Uma tentativa de se contornar o problema de comparação entre resíduos consiste no estabelecimento de “faixas de tolerância” a serem utilizadas no processo de comparação dos resíduos normalizados. Para refinar a lista de medidas obtidas via tal processo comparativo, Ayres e Haley [4] empregam testes baseados em propriedades dos elementos da matriz de covariância dos resíduos. Isto exige o cálculo de elementos fora da diagonal desta matriz o que, mesmo empregando-se técnicas de matriz esparsa inversa, implica em aumento do esforço computacional.

Para evitar as dificuldades acima expostas, é mais razoável basear a determinação de medidas e conjuntos críticos nos aspectos topológicos do problema, que apresentam as vantagens de serem invariantes com as condições de carga do sistema e de não requererem comparações de quantidades em ponto flutuante.

O método proposto neste trabalho é essencialmente topológico, isto é, os algoritmos correspondentes processam basicamente o plano de medição utilizado e a estrutura (topologia) da rede elétrica. Baseia-se nas definições de medidas e conjuntos críticos enunciados na Seção 3, e tira proveito da disponibilidade de um eficiente algoritmo para análise da observabilidade topológica desenvolvido em etapas anteriores da pesquisa [7,6]. Uma vantagem do método é permitir que a reciprocidade entre medidas pertencentes a um mesmo conjunto crítico seja explorada, para propiciar a verificação cruzada dos resultados. A determinação destes conjuntos, por outro lado, é

um processo enumerativo, tornando os algoritmos propostos mais apropriados para estudos “off-line” do planejamento de sistemas de medição a serem utilizados na EESP.

4.2 Algoritmo para Análise da Observabilidade - Procedimento

Tendo em vista que o algoritmo para análise da observabilidade é básico para os métodos propostos para a determinação de medidas e conjuntos críticos, faz-se nesta subseção uma breve descrição de suas etapas. O seu detalhamento completo é apresentado em [6].

O algoritmo busca essencialmente uma *árvore geradora* (isto é, uma árvore que inclui todos os vértices do grafo considerado), dotada de certas propriedades adicionais, em um grafo Z , chamado *grafo de medição* do sistema. O grafo Z é obtido do diagrama unifilar (topologia) da rede e do plano de medição M mediante as seguintes regras:

- Os vértices de Z correspondem às barras do sistema de potência;
- Se o fluxo de potência entre as barras i e j é medido, então uma aresta conectando os vértices correspondentes aparecerá em Z , sendo associada àquela medida de fluxo (será referida como *aresta de fluxo*);
- Se a injeção na barra i for medida, o vértice i em Z será conectado a cada um dos vértices correspondentes às barras adjacentes à barra i , através de arestas que serão todas associadas à medida de injeção considerada (estas arestas serão referidas como *arestas de injeção*).

Se existir uma árvore geradora de Z tal que *não existam duas de suas arestas associadas à mesma medida*, conclui-se que o sistema de potência é topologicamente observável com respeito a M [6]. A árvore geradora é então chamada árvore geradora observável (AGO).

Pela definição do grafo de medição, verifica-se que existe uma correspondência biunívoca entre medidas de fluxo e arestas a elas associadas (se for considerado que é feita apenas uma medida de fluxo para cada linha). O mesmo, entretanto não se aplica às medidas de injeção, que em geral são associadas a mais do que uma aresta de Z . Reconhecendo esta diferença, o algoritmo processa separadamente as arestas de fluxo e de injeção. A Figura 1 mostra as etapas básicas do algoritmo, que são discutidas a seguir.

O processamento de arestas de fluxo consiste basicamente na busca de uma floresta observável F (isto é, de uma coleção de árvores observáveis) no subgrafo de Z formado apenas por arestas de fluxo. Se F já for uma AGO de Z , o sistema é topologicamente observável, sem a necessidade de se processar as arestas de injeção. Em caso contrário, F servirá de ponto de partida para a segunda parte do algoritmo, em que as arestas de injeção são examinadas individualmente, na tentativa de se

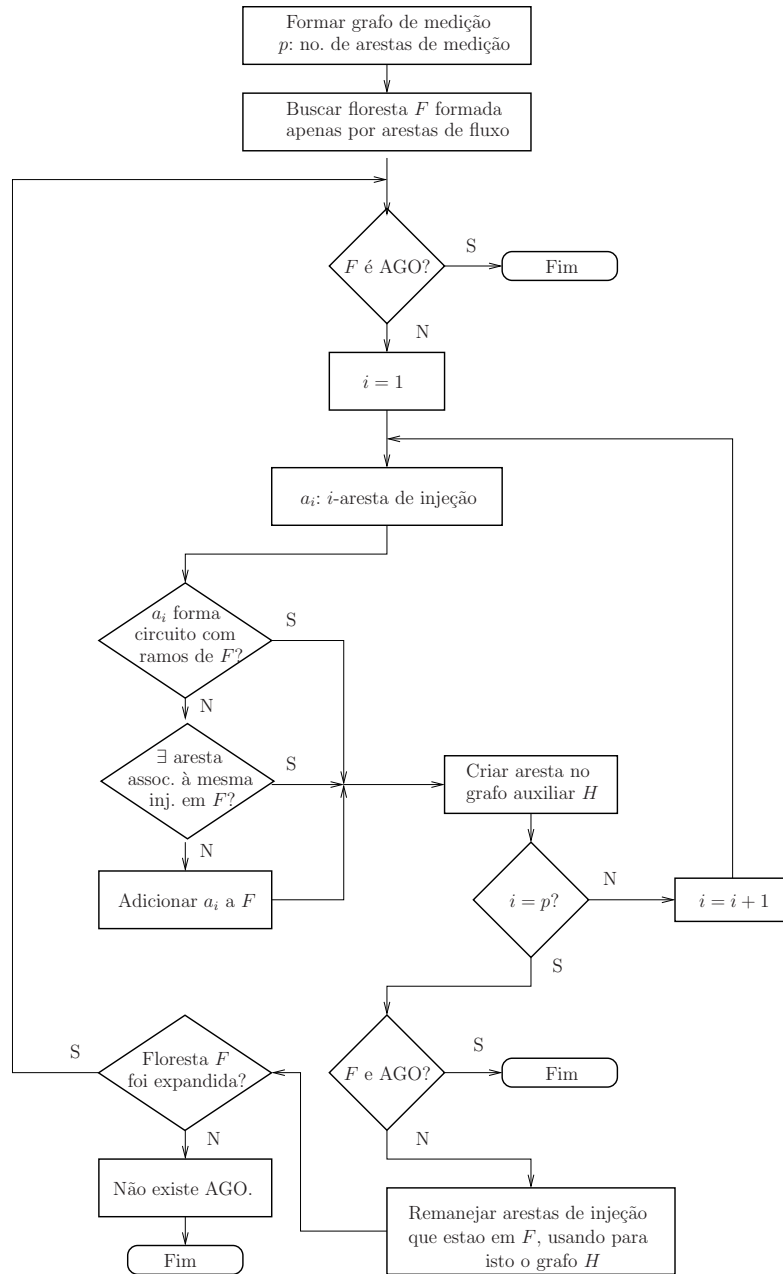


Figura 1. Procedimento OBSERV (M, T, F)

expandir F . Uma aresta de injeção é adicionada a F se não formar nenhum ciclo com os ramos de F e não existir em F nenhuma aresta associada à mesma medida de injeção.

Como não se sabe “a priori” qual aresta dentre as associadas a uma dada medida de injeção deve ser a escolhida para propiciar a máxima expansão de F , faz-se necessário um meio auxiliar mediante o qual as arestas de F associadas à mesma medida de injeção possam ser remanejadas. Para isso, as arestas que não obedecerem à regra acima para inclusão em F não são descartadas: são utilizadas, juntamente com as arestas de injeção em F , na construção de um grafo auxiliar H . Se, ao cabo

do processamento de todas as arestas de injeção, uma AGO não for encontrada, o grafo H é utilizado com o objetivo de aumentar a floresta F corrente. Caso isto seja possível e a nova floresta não for ainda uma AGO, o algoritmo volta a processar as arestas de injeção, mas agora a partir da nova floresta. Se F não puder ser expandida mediante o uso do grafo H , é possível se afirmar que não existe uma AGO, e que a floresta F é máxima.

A construção do grafo auxiliar H e a sua utilização visando a expansão da floresta corrente são detalhados em [6].

Para facilitar a descrição dos algoritmos das subseções seguintes, o método acima descrito será referido como:

Procedimento OBSERV (M, T, F)

Entradas: - Plano de Medição, M - Topologia da Rede, T .

Saída: - Floresta observável, F (se o sistema for observável com respeito a M , F é uma AGO).

4.3 Algoritmo para a Determinação de Medidas Críticas - Procedimento

O procedimento proposto para a identificação das medidas críticas presentes em um plano de medição é baseado na definição introduzida na Seção 3: a eliminação de uma medida crítica do plano de medição torna o sistema não-observável. Em termos dos conceitos de observabilidade topológica e árvore geradora observável da Seção 4, esta definição pode ser re-enunciada como:

Seja M um plano de medição tal que o sistema de potência considerado é observável com respeito a M , isto é, existe uma árvore geradora observável F no grafo de medição correspondente, Z . Uma medida z_i é crítica se não mais existir uma AGO no grafo obtido de Z pela supressão das arestas correspondentes a z_i .

Da definição acima é possível se inferir que, se z_i é crítica, então necessariamente aparecerá uma aresta associada a z_i em qualquer AGO do grafo de medição Z correspondente a M , $z_i \in M$. Esta conclusão é importante, porque permite restringir a busca de medidas críticas ao subconjunto de M cujas medidas estão associadas às arestas da AGO. Para um sistema de N barras, para o qual qualquer grafo de medição terá N vértices, isto significa que basta simular a supressão de $(N - 1)$ medidas para se determinar as medidas críticas (já que qualquer árvore de um grafo com N vértices tem $(N - 1)$ arestas).

O algoritmo para a identificação de medidas críticas é baseado nas constatações acima, e será denominado MDCRIT:

Procedimento MDCRIT (M, T, C_o);

Entradas: - Plano de Medição, M Topologia da Rede, T ;

Saída: - Conjunto de medidas críticas, C_o .

A Figura 2 apresenta o fluxograma para MDCRIT. Observa-se que o algoritmo recorre N vezes ao procedimento para determinação da observabilidade topológica, OBSERV. A primeira chamada tem o objetivo de construir a AGO básica, cujas $(N-1)$ medidas associadas são em seguida retiradas uma a uma do plano de medição, correspondendo a cada uma destas eliminações uma nova chamada ao procedimento OBSERV. No caso de não existir uma AGO básica, o problema não é o da determinação de medidas críticas, mas sim o de incluir novas medidas (ou pseudomedidas) em M para recuperar a observabilidade [6], o qual não é abordado neste trabalho.

4.4 Algoritmo para a Identificação de Conjuntos Críticos - Procedimento

Neste trabalho, a determinação de conjuntos críticos é baseada em um método enumerativo, que recorre sucessivamente ao procedimento MDCRIT da Subseção 4.3. Trata-se basicamente de aplicar a definição da Seção 3, suprimindo-se uma de cada vez as medidas não-críticas do plano de medição e aplicando-se o procedimento MDCRIT para se determinar quais medidas se tornaram críticas em consequência de cada eliminação.

As observações seguintes são importantes para a perfeita compreensão do procedimento proposto:

- (1) De acordo com a teoria apresentada na Seção 3, *uma medida crítica não pode fazer parte de nenhum conjunto crítico*. Logo, medidas críticas devem ser excluídas do subconjunto de M onde se pesquisa a existência de conjuntos críticos.
- (2) Quando da busca de um conjunto crítico que inclua a medida z_i , tem-se interesse apenas nas medidas que passaram da condição de não-críticas para críticas *como consequência imediata da eliminação de z_i* . As medidas que já eram críticas antes desta supressão evidentemente não integrarão um possível conjunto crítico que inclua z_i .
- (3) Há reciprocidade entre elementos de conjuntos críticos, isto é, se a medida z_k se torna crítica quando z_j é eliminada, então z_j se tornará crítica após a eliminação de z_k . Explorando-se esta propriedade, é possível se reduzir substancialmente o número de buscas de conjuntos críticos. Alternativamente, a reciprocidade pode ser utilizada como um meio de verificação de resultados.

O fluxograma da Figura 3 apresenta o Procedimento CJCRIT, cujas variáveis de entrada e saída são descritas abaixo:

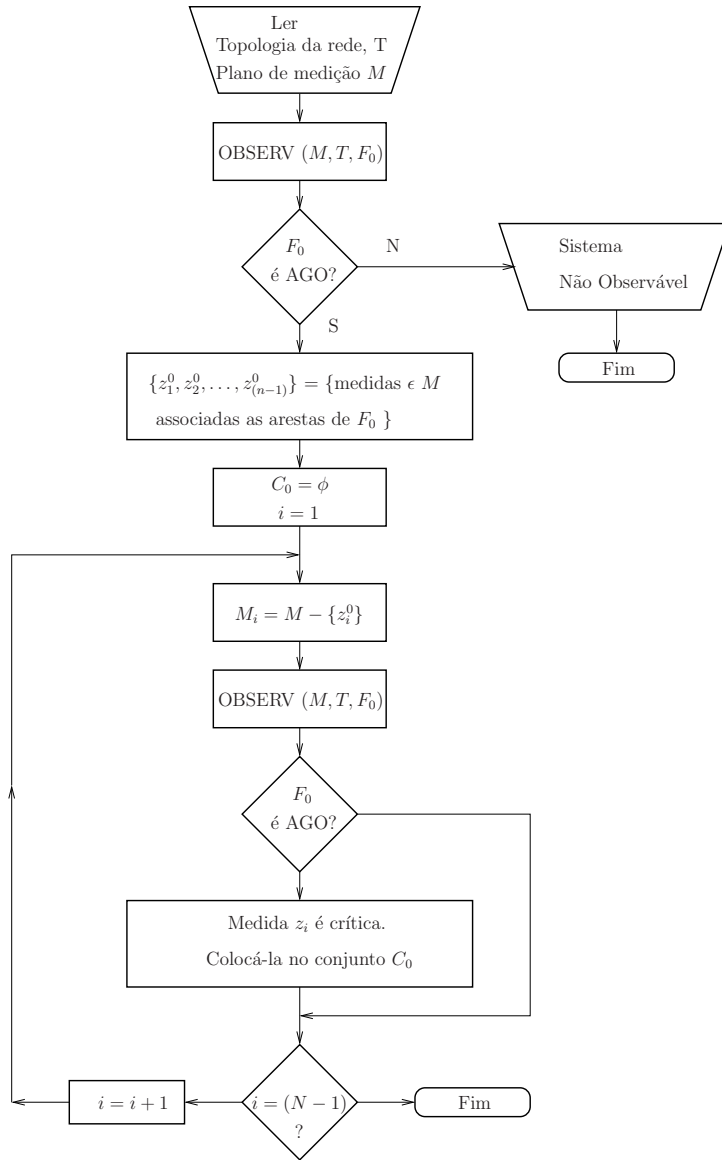


Figura 2. Procedimento MEDCRIT (M, T, C_0)

5 Resultados

O sistema IEEE-14 barras, cujo diagrama unifilar é apresentado na figura 4, foi utilizado para testar os métodos propostos. O uso deste sistema tem sido bastante freqüente na literatura, em estudos de observabilidade e tópicos correlatos [3,5], e também em aplicações de técnicas de processamento de EGs múltiplos [2,8]. Alguns dos resultados apresentados nestas referências serão úteis para a verificação do desempenho dos algoritmos de determinação de medidas e conjuntos críticos.

Os programas que implementam os algoritmos da Seção 4 foram escritos em FORTRAN e executados utilizando-se um compilador FORTRAN G no computador IBM 4341 da UFSC. Todos os planos de medição utilizados pressupõem que as medidas

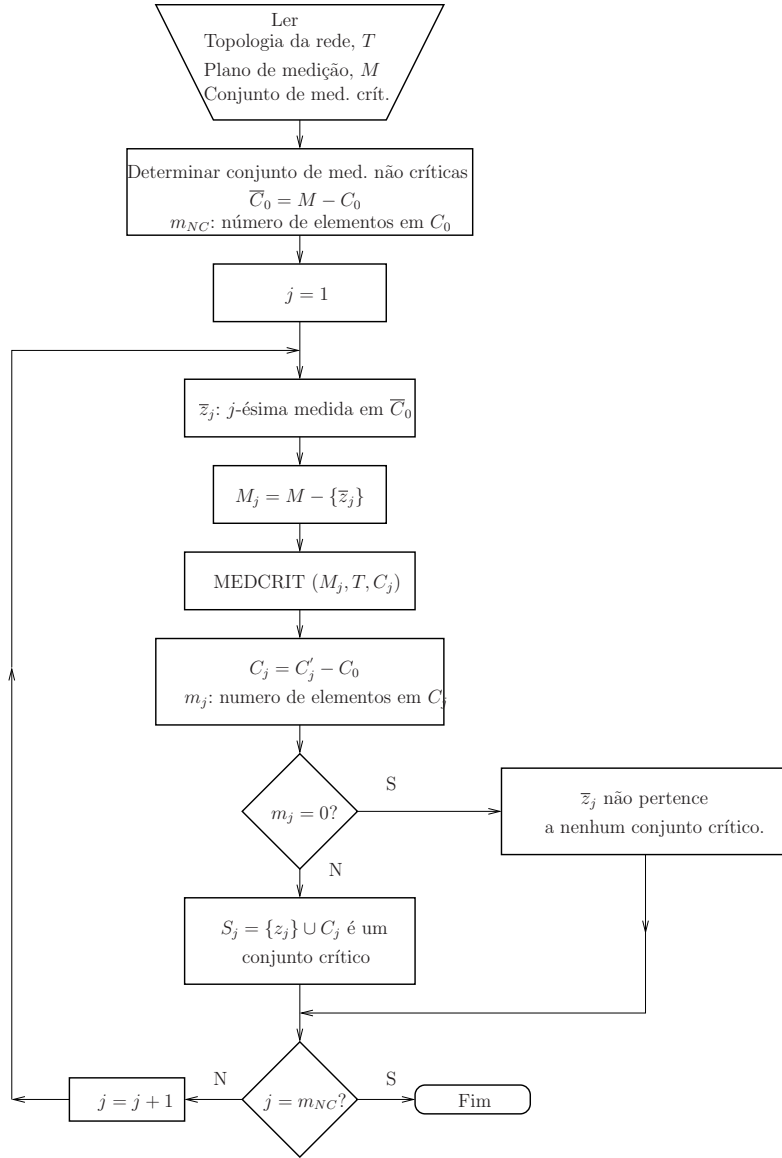


Figura 3. Procedimento CJCRT (M, C_0, T, S)

ativas e reativas são tomadas aos pares, havendo uma medida de tensão nas barras de referência.

A Tabela 1 apresenta os diversos planos de medição utilizados para os dois sistemas-teste. Os casos A.1 e B.2 foram obtidos de [8], com a ressalva que, para o sistema de 30 barras, eliminou-se uma das medidas de fluxo nas linhas que têm os dois extremos monitorados.

A Tabela 2 apresenta os resultados da aplicação dos métodos de identificação de medidas e conjuntos críticos aos casos da Tabela 1. Para o caso A.1, confirmam-se as conjecturas feitas por Amaral [8] que, através de análise baseada nos valores numéricos de resíduos normalizados, havia concluído pela existência das medidas e conjuntos críticos indicados na Tabela 2. As medidas críticas encontradas para

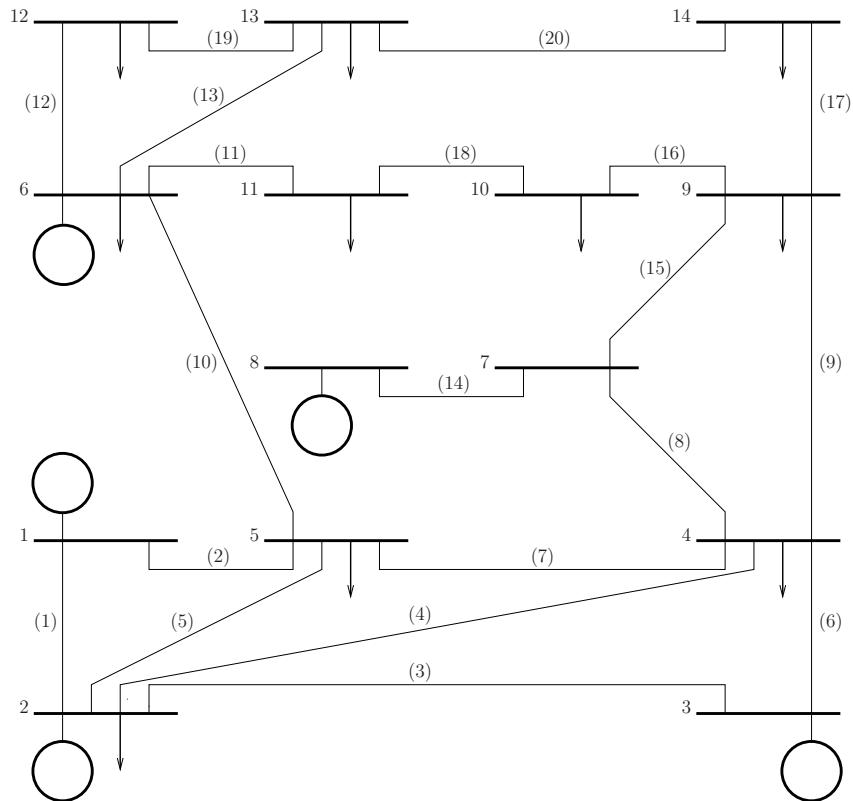


Figura 4. Sistema IEEE-14 barras - diagrama unifilar

Tabela 1
Planos de medição.

Caso	Sistema	Medidas de Injeção		Medidas de Fluxo	
		Quant.	Barras Monit.	Quant.	Linhas Monit.
A.1	14 barras	8	1, 3, 5, 8, 9, 12 a 14	14	1-2, 1-5, 2-4, 2-5, 3-4, 4-5, 4-7, 5-6, 6-12, 6-13, 9-11, 9-14, 10-11, 13-14
A.2	14 barras	9	1 a 4, 9, 11, 12 a 14	6	1-2, 1-5, 4-7, 6-1, 7-8, 7-9
A.3	14 barras	11	1 a 7, 9, 11, 12, 13	5	1-2, 4-7, 4-9, 7-8, 7-9

o caso A.2 são as mesmas obtidas por Clements e outros [3]. As medidas e pares críticos correspondentes ao caso A.3 podem ser facilmente confirmados por inspeção, superpondo-se os planos de medição respectivos ao diagrama unifilar dos sistemas; a verificação para os conjuntos críticos de maior dimensão não é contudo tão imediata.

Tabela 2
Planos de medição.

Caso	Medidas Críticas	Conjuntos Críticos
A.1	P_8, t_{10-11}	$\{ P_3, t_{3-4} \}$ $\{ P_9, t_{4-7}, t_{9-11} \}$
A.2	$P_9, P_{11}, P_{12}, P_{13},$ $P_{14}, t_{6-10}, t_{7-8}$	$\{ P_2, P_3, P_4, t_{4-7}, t_{7-9} \}$
A.3	$P_5, P_6, P_9, P_{11}, P_{12},$ P_{13}	$\{ P_7, t_{7-8} \}$ $\{ P_1, P_2, P_3, P_4, t_{1-2} \}$

6 Conclusões

O impacto desfavorável da presença de medidas e conjuntos críticos sobre o processamento de erros grosseiros e sobre a confiabilidade de planos de medição torna necessária a disponibilidade de meios para identificá-los. Procedimentos com este objetivo são propostos neste artigo, após terem sido apresentadas as definições e propriedades pertinentes. Os procedimentos sugeridos são baseados na aplicação sucessiva de um algoritmo para análise da observabilidade desenvolvido em etapas anteriores da pesquisa sobre estimação de estados em sistemas de potência. Os resultados do uso das técnicas propostas para um sistema-teste é verificado mediante comparação com outros trabalhos e/ou por inspeção dos planos de medição.

Há necessidade de investigação adicional para se chegar a algoritmos com tempo de execução compatível com a aplicação em tempo real. Neste sentido, pretende-se continuar a pesquisa ao longo das seguintes linhas:

- Melhoria da eficiência computacional dos métodos propostos. Um passo nesta direção consiste em se evitar a completa reconstrução do grafo de medição Z , a cada nova análise de observabilidade; ao invés disso, pode-se implementar meios de modificá-lo em função da medida cuja eliminação está sendo considerada.
- Pesquisa de métodos não-enumerativos para a determinação de medidas e conjuntos críticos. Um algoritmo combinatório, preliminar com esta finalidade está sendo presentemente considerado.

Objetiva-se também, no estágio subsequente da pesquisa, levantar certas restrições do atual algoritmo de observabilidade, como as relativas ao processamento de planos de medição sem simetria $P\delta/QV$, e também ao processamento de duas medidas de fluxo na mesma linha. Espera-se que, ao final, seja obtido um algoritmo computacionalmente eficiente e aplicável a qualquer situação realística, dentro da operação em tempo real de sistemas de potência.

Referências

- [1] A. Monticelli and A. Garcia. Reliable bad data processing for real-time state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102(10):1126–1139, 1983.
- [2] L. Mili, T. Van Cutsem, and M. Ribbens Pavella. Hypothesis testing identification: a new method to bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(11), Nov 1984.
- [3] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis. Power system state estimation residual analysis: An algorithm using network topology. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(4):1799–1787, 1981.
- [4] M. Ayres and P. H. Haley. “Bad Data Groups in Power System State Estimation”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, (3):1–9, Feb. 1986.
- [5] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis. “Power System Estimation With Measurement Deficiency - An Observability/Measurement Placement Algorithm”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 102(7):2012–2020, Jul. 1983.
- [6] A. Simões Costa and A. Mandel. “A Abordagem Topológica Observabilidade de Sistemas de Potência: Teoria e Algoritmo”. *Rev. SBA:Controle e Automação*, 1(1):59–71, 1986.
- [7] V. H. Quintana, A. J. A. Simões Costa, and A. Mandel. Power system topological observability using a direct graph- theoretic approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(3):617–626, 1982.
- [8] S. do Amaral. Métodos para o processamento de erros grosseiros múltiplos em estimadores de estado seqüenciais ortogonais. Master’s thesis, Universidade Federal de Santa Catarina - Brasil, 1987.
- [9] K.A. Clements, P.W. Davis, and G.R. Krumpholz. Electrical Power Network Measurement System Design. Technical report, Worcester Polytechnic Institute, March 1981. NSF Grant no. ENG 78-08407.
- [10] T. Van Cutsem. “Power System Observability and Related Functions: Derivation of Appropriate Strategies and Algorithms”. *Electrical Power and Energy Systems*, 7:175–187, 1985.