

A ABORDAGEM TOPOLÓGICA PARA OBSERVABILIDADE DE
SISTEMAS DE POTENCIA: TEORIA E UM ALGORITMO.

Antonio J. A. Simões Costa
Departamento de Engenharia Elétrica - UFSC
Caixa Postal 476 - 88.049 - Florianópolis - SC

Arnaldo Mandel
MAP - IMEUSP - Caixa Postal 20.570 - Ag. Iguatemi
01.000 - São Paulo - SP

RESUMO

Aborda-se o problema de observabilidade de sistemas de potência para aplicações em estimação de estados, dando ênfase à análise através de métodos topológicos. Após uma abrangente revisão da teoria, apresenta-se em detalhes um algoritmo combinatório para a determinação da observabilidade topológica. O algoritmo é resultante da introdução de modificações estruturais em um método previamente proposto na literatura, as quais visam melhorar a eficiência computacional. Problemas correlatos, como a determinação de medidas críticas e estimação de estados em sistemas com planos de medição deficientes são igualmente abordados. O artigo também apresenta alguns resultados da aplicação do algoritmo proposto a diferentes sistemas-teste.

ABSTRACT

Attention is focused on the problem of power system observability for state estimation applications, with emphasis on analysis via topological methods. After a comprehensive theoretical review, a combinatorial algorithm for topological observability determination is presented in detail. The algorithm results from several modifications introduced into a previously proposed method, which are aimed at improving the computational efficiency. Related problems such as critical measurement determination and state estimation for systems with measurement deficiencies are equally discussed. The paper also presents some results obtained by applying the proposed algorithm to different test systems.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Observabilidade de Sistemas de Potência e Suas Aplicações

O problema da observabilidade de sistemas de potência consiste essencialmente em se determinar se as medidas que compõem um determinado plano de medição fornecem informação suficiente para a estimação dos estados do sistema. A análise da observabilidade é particularmente importante na operação em tempo real de sistemas de potência, pois seus resultados podem determinar mudanças nos procedimentos para se estimar

os estados do sistema.

Em caso de deficiência no plano de medição, por exemplo, a rotina de observabilidade poderá fornecer subsídios para, em uma etapa subsequente, proceder-se à estimação de estados dos componentes (ilhas) observáveis do sistema. Alternativamente, é possível se lançar mão de procedimentos para a alocação de pseudomedidas apropriadas que, adicionadas ao plano de medição deficiente, permitirão a recuperação da observabilidade do sistema como um todo.

Outro subproduto importante da análise de observabilidade é a determinação de me-

didadas críticas e pares críticos. A sua correta identificação é importante tanto para indicar pontos de reforço do plano de medição quanto para o processamento de erros grosseiros, como será comentado na seção 4.

As rotinas para determinação da observabilidade também se constituem em valiosa ferramenta de projeto do sistema de medição. Busca-se aqui garantir a obtenção de estimativas confiáveis mesmo no caso de ocorrência de perda de algumas medições durante a operação, por falha do sistema de telemedição ou por eliminação decorrente do processamento de erros grosseiros. Os testes de observabilidade podem ser utilizados para avaliar os planos de medição propostos e indicar onde estes devem ser reforçados, através do acréscimo de novas medidas.

1.2. Revisão da Literatura

A influência do plano de medição sobre o desempenho do estimador e as dificuldades associadas à distribuição dos medidores no sistema para fins de estimação de estados foram inicialmente discutidas na literatura por Schweppe e Wildes (1970). Diferentes técnicas foram em seguida propostas para abordar o problema, tendo por base os mais diversos conceitos, tais como número de condicionamento da matriz de informação (Edelmann, 1975), índices de confiabilidade (Ariatti e outros, 1975), observabilidade de sistemas lineares (Fetzer e Anderson, 1975), teoria da informação (Phua e Dillon, 1977), etc. Todos estes métodos tinham em comum o fato de empregarem cálculos em ponto flutuante e terem sido de fato desenvolvidos para uso em estudos de projeto de planos de medição.

O termo "observabilidade", no contexto de estimação de estados, começou a ser empregado a partir de 1975, ano em que também surgiram os primeiros métodos que, sendo baseados em procedimentos puramente lógicos, apresentavam possibilidade de aplicação tanto em estudos de projeto do plano de medição quanto na operação em tempo real. A esta classe pertencem os métodos de Handschin e Bongers (1975), que consiste na investigação da estrutura da matriz Jacobiana, e de Clements e Wollenberg (1975), onde é proposto um algoritmo heurístico baseado em conceitos de topologia da rede e nas leis de Kirchhoff. O primeiro método fornece apenas uma condição necessária fraca para a observabilidade, enquanto que o segundo pode levar a resultados conservativos,

como foi mais tarde demonstrado (Allemong e outros, 1980; Krumpholz e outros, 1980). Apesar disso, o artigo de Clements e Wollenberg contribuiu com algumas idéias e conceitos (como o de "ilha observável", por exemplo) que foram retomados em trabalhos subsequentes. Assim, o método foi estendido para estimadores desacoplados (Horton e Masiello, 1977) e um algoritmo combinatório baseado no princípio de geração de árvores para conectar ilhas observáveis foi posteriormente proposto (Allemong e outros, 1980). O uso de um algoritmo de fluxo máximo em redes com o mesmo objetivo é proposto por Machado e Gorenstin (1981) que também incluem considerações sobre "taps" de transformadores na análise de observabilidade.

Os conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica e um arcabouço teórico consistente para o problema de observabilidade topológica foram afinal introduzidos por Krumpholz, Clements e Davis (1980). O artigo propõe igualmente a aplicação de um algoritmo de fluxo em redes de transporte para a determinação da observabilidade topológica. Uma formulação distinta para o problema, porém assentada na mesma base teórica, é utilizada por Quintana, Simões Costa e Mandel (1982), que fazem uso de um algoritmo de interseção de matrôides para testar a observabilidade. Em caso de não-observabilidade, a técnica proposta propicia a obtenção da máxima floresta observável. Com esta informação, é possível se obter o conjunto de ilhas observáveis do sistema (Clements e outros, 1982) e então alocar pseudomedidas que tornem o sistema global observável (Clements e outros, 1983; Simões Costa e Alfaya dos Santos, 1985; Broussolle e Le Roy, 1982).

Outros métodos combinatórios têm sido propostos para análise da observabilidade, como a técnica enumerativa de Van Cutsem e Gailly (1983), que utiliza o conceito de classes de equivalência em grafos, e um algoritmo de múltiplos estágios para aglutinação de ilhas observáveis (Horisberger, 1985). O uso do conceito de emparelhamentos ("matchings") em grafos bipartidos, originalmente sugerido por Quintana e Simões Costa (1981) e cujos resultados mostraram-se mais tarde conservativos, voltou a ser ultimamente proposto, com algumas modificações de formulação (Bargiela e outros, 1986).

Mais recentemente, a abordagem do problema de observabilidade a partir de méto-

dos baseados em cálculos em ponto flutuante tem sido retomada, mas desta vez visando a aplicação em tempo real. Trata-se de tirar proveito de resultados parciais da fatoração triangular da matriz ganho da equação normal, de modo a identificar ilhas observáveis e alocar pseudomedidas (Monticelli e Wu, 1985a e 1985b). O algoritmo proposto foi posteriormente estendido para uso em conexão com estimadores baseados em métodos ortogonais ou híbridos (Monticelli e Wu, 1986; Murari, 1986).

2. OBSERVABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA: DEFINIÇÕES E TEORIA

2.1. Definição de Observabilidade

Considere um conjunto M de medidas que constituem o plano de medição de um sistema de potência para fins de estimação de estados. Supõe-se que as quantidades medidas são injeções de potência ativa e reativa nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e módulos de tensão. A noção de observabilidade de sistemas de potência é formalmente expressa através da seguinte definição:

Um sistema de potência é observável, no sentido da estimação estática de estados, com respeito a um dado conjunto de medidas M se as variáveis de estado do sistema (módulos e ângulos das tensões em todas as barras) podem ser determinadas através do processamento das medidas em M por um estimador de estados. Em caso contrário, o sistema é considerado não-observável com respeito a M .

A definição acima, embora clara, não é operacional para fins de análise de observabilidade. Para isso, será necessário caracterizar o conceito de observabilidade em termos de certas matrizes e grafos associados à topologia da rede e do plano de medição, os quais serão introduzidos a seguir.

2.2. Modelo de Medição Linearizado

Considere que m medidas são distribuídas em um sistema de potência de N barras, e seja $n = 2N - 1$ o número de variáveis de estado a serem estimadas ($N - 1$ ângulos e N módulos de tensões nas barras). Linearizando-se o modelo de medição (ver, por exemplo, Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982) com respeito ao vetor de estados \underline{x} , obtém-se o seguinte modelo de medição linearizado:

$$\Delta \underline{z} = H(\underline{x}) \Delta \underline{x} + \underline{\eta} \quad (1a)$$

$$E(\underline{\eta}) = \underline{0}; E(\underline{\eta}\underline{\eta}^T) = R \quad (1b)$$

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

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados ponderados, uma estimativa para $\Delta \underline{x}$ é obtida através da minimização da função objetivo

$$J(\Delta \underline{x}) = [\Delta \underline{z} - H \Delta \underline{x}]^T R^{-1} [\Delta \underline{z} - H \Delta \underline{x}] \quad (2)$$

onde, por conveniência, descartou-se o argumento de $H(\cdot)$. A solução final do problema de estimação de estados é obtida através de um procedimento iterativo em que $\Delta \underline{x}$ é calculado a cada iteração resolvendo-se a chamada equação normal:

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

onde

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

é a matriz de informação ou matriz ganho. O vetor $\Delta \underline{x}$ é então utilizado para atualizar o estado corrente, obtendo-se assim o novo vetor de estados a ser utilizado na iteração seguinte.

2.3. Observabilidade Algébrica e Observabilidade Numérica

Da definição introduzida no início desta seção, fica clara a relação entre a questão da observabilidade e o posto da matriz G . De fato, para que se possa resolver a equação normal, é condição necessária que a matriz quadrada ($n \times n$) G seja não-singular. Dado que a matriz de covariância dos erros de medição R é geralmente suposta diagonal e não-singular, isto implica em que a matriz Jacobiana H deve ter posto completo; ou seja, como $m \geq n$, o posto de H deve ser igual a n . Há portanto a necessidade de se dispor de pelo menos um subconjunto de M composto por n medidas tais que as n linhas correspondentes da matriz Jacobiana sejam linearmente independentes. Esta constatação conduz à definição de observabilidade algébrica:

Um sistema de potência é **algebricamente observável** com respeito a um conjunto de

medidas M se a matriz Jacobiana H tem posto igual a n , que é a dimensão do vetor de estados x .

Conforme a definição acima, a observabilidade algébrica depende do ponto de operação usado para a linearização do modelo de medição. Krumpholz, Clements e Davis (1980) consideram este ponto de operação como sendo o "flat start" (módulos e ângulos das tensões em todas as barras iguais a 1,0 pu e 0,0 rad, respectivamente), além de adotarem a aproximação desacoplada para H proposta por Schweppe e Rom (1970).

Apesar de um sistema ser algebricamente observável, é possível que, no curso da solução iterativa, surjam problemas numéricos que impeçam a convergência, motivados por mau condicionamento da matriz H ou pelo fato de o estado real estar muito afastado dos valores iniciais atribuídos aos estados. Para levar em conta este fato, introduz-se a seguinte definição (Krumpholz, Clements e Davis, 1980):

Um sistema de potência é numericamente observável com respeito a M se as estimativas para os estados podem ser obtidas através de solução iterativa partindo de valores iniciais iguais a 1,0 pu para os módulos e 0,0 rad para os ângulos das tensões nas barras.

Verifica-se portanto, que embora a observabilidade numérica implique na observabilidade algébrica, a recíproca não é em geral verdadeira.

Testar a observabilidade numérica equivale a resolver o problema de estimação estática de estados a partir do "flat start", para um dado plano de medição M . Os métodos baseados na fatoração triangular recentemente propostos (Monticelli e Wu, 1985a, 1985b, 1986) destinam-se na realidade à verificação da observabilidade numérica, já que são implementados do próprio processo de solução da equação normal.

Outro teste possível para a observabilidade seria o cálculo (em ponto flutuante) do posto da matriz Jacobiana, determinando-se desta maneira a observabilidade algébrica do sistema. Embora algoritmos adequados para cálculo do posto de uma matriz estejam hoje disponíveis (Golub, Klema e Stewart, 1976), o tempo de cálculo por eles exigido não é compatível com aplicações em tempo real. Além disso, não se obteriam indicações sobre os pontos do sistema de medição

que poderiam necessitar de reforço, nem a cerca de ilhas observáveis.

Neste trabalho, a atenção é dedicada a métodos que não dependem de valores numéricos dos elementos da matriz Jacobiana mas, ao invés disso, investigam se o conjunto de medidas M fornece informação suficiente a cerca da rede de modo a permitir a estimação de estados. Deste ponto de vista, a determinação da observabilidade torna-se o estudo da topologia de um grafo derivado da rede original de acordo com a distribuição das medidas em M pelo sistema de potência.

2.4. Observabilidade Topológica

2.4.1. Modelo de Medição Desacoplado e Observabilidade P- δ e Q-V

A introdução das noções de observabilidade P- δ e observabilidade Q-V, que são importantes para a investigação da observabilidade topológica, implica na decomposição do problema em dois subproblemas separados. O princípio em que se baseia esta separação é similar àquele utilizado no fluxo de potência desacoplado rápido. Consiste em se reconhecer que medidas de potência ativa são portadoras de maior quantidade de informação sobre os ângulos das tensões nas barras relacionadas às quantidades medidas do que sobre os módulos das mesmas tensões. Reciprocamente, medidas de potência reativa fornecem maior informação sobre a magnitude das tensões do que sobre os seus ângulos.

Considerando o desacoplamento P- δ /Q-V e supondo que a relação reatância/resistência para as impedâncias série das linhas de transmissão é muito maior do que 1,0, Schweppe e Rom (1970) desenvolveram o seguinte modelo de medição desacoplado aproximado:

$$\underline{z}_P = H_P \underline{\delta} + \underline{\eta}_P \quad (5a)$$

$$\underline{z}_Q = H_Q \underline{v} + \underline{k} + \underline{\eta}_Q \quad (5b)$$

O vetor \underline{z}_P é formado pelas medidas de injeção e de fluxo de potência ativa e o vetor \underline{z}_Q contém as medidas de magnitude de tensão, de injeção e de fluxo de potência reativa. Os erros de medição correspondentes são representados por $\underline{\eta}_P$ e $\underline{\eta}_Q$. Os vetores $\underline{\delta}$ e \underline{v} contêm $N-1$ ângulos das tensões nas barras (o ângulo da barra de referência é excluído) e as N magnitudes das mesmas tensões, respectivamente. O vetor constante \underline{k} depende das admitâncias em derivação das linhas de transmissão e seus elementos

apresentam usualmente pequeno valor absoluto. Finalmente, as matrizes H_p e H_Q dependem basicamente do plano de medição, da topologia da rede elétrica e das admitâncias série das linhas. Adicionalmente, H_Q depende também em menor grau das admitâncias em derivação das linhas do sistema.

Com os modelos desacoplados dados pelas Eqs.(5), pode-se agora introduzir as seguintes definições:

Um sistema de potência de N barras é $P-\delta$ ($Q-V$) algebricamente observável com respeito a um conjunto de medidas ativas (reativas) se e somente se o posto da matriz H_p (H_Q) é igual a $N-1$ (N).

Em caso de não se verificar paridade entre as medidas ativas e reativas, os problemas de observabilidade $P-\delta$ e $Q-V$ devem ser analisados separadamente. Uma dificuldade que surge nesse caso é a assimetria introduzida pelas medidas de magnitude de tensão, sem similar no subproblema $P-\delta$. É entretanto possível substituí-las por medidas de fluxo reativo em uma linha fictícia, de susceptância unitária, ligando a barra onde se mede a tensão à barra de referência (Van Cutsem e Gailly, 1983; Clements, Krumpholz e Davis, 1982).

No caso geral, portanto, qualquer algoritmo de análise da observabilidade deve ser executado duas vezes para o mesmo sistema. Contudo, os planos de medição utilizados na prática normalmente apresentam as medidas de injeção e fluxo tomadas em pares ativo/reativo. Se for considerada a presença de medida de tensão apenas na barra de referência, isto significa que conclusões sobre as observabilidades $P-\delta$ e $Q-V$ podem ser obtidas a partir de uma única aplicação do algoritmo de observabilidade.

Sem perda de generalidade, será considerado neste trabalho que as medidas de potência são tomadas em pares ativo/reativo.

2.4.2. Alguns Conceitos Topológicos Importantes

Para poder definir as condições segundo as quais um sistema é topologicamente observável, é necessário revisar alguns conceitos de teoria de grafos e introduzir as definições de grafo da rede elétrica e de associação de uma medida a uma aresta deste grafo.

Dado um grafo G , uma sequência alternada de vértices e arestas de G que se inicia e termina em vértices, tal que cada aresta e incidente no vértice que a precede e no vértice que a segue, é denominada um caminho entre o vértice inicial e o vértice final. Um ciclo é um caminho em que o vértice inicial coincide com o vértice final. Uma árvore de G é um subgrafo que não apresenta ciclos e é conexo (isto é, existe um caminho entre cada par de seus vértices). Uma floresta é um conjunto de árvores, e uma árvore geradora de G se caracteriza por possuir o mesmo conjunto de vértices que G (Szwarcfiter, 1984).

O grafo da rede associado a um sistema de potência é definido como um grafo cujos vértices correspondem às barras do sistema e cujas arestas correspondem às linhas de transmissão, conforme representado no diagrama unifilar do sistema.

Uma medida z pertencente a M pode ser associada a uma aresta a do grafo da rede se (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982):

- (i) z é uma medida de fluxo na linha de transmissão do sistema de potência que corresponde à aresta a ;
- (ii) z é uma medida de injeção em qualquer uma das barras terminais de linha do sistema que corresponde à aresta a .

Observa-se que a definição acima decorre do exame da estrutura da matriz Jacobiana do modelo de medição linearizado. Assim, a presença de uma medida de fluxo produzirá uma equação que envolverá apenas as tensões complexas das barras terminais da linha onde é feita a medida. O efeito de uma medida de injeção de potência, por outro lado, é interrelacionar a tensão complexa da barra medida com as tensões complexas de todas as barras a ela conectadas.

Diz-se que uma floresta F do grafo da rede é observável com respeito a M se for possível se definir uma associação de medidas em M com cada uma das aresta de F , de modo que não existam duas arestas de F associadas à mesma medida.

As definições de árvore observável e de árvore geradora observável são casos particulares da definição acima. Note que a definição exige a existência de uma correspondência biunívoca entre o conjunto de arestas de F e um subconjunto M_1 de M cujo número de elementos é igual ao número de

arestas de F. No caso de medidas de fluxo, esta correspondência é bem definida. Uma medida de injeção em uma barra do sistema, por outro lado, pode ser associada a qualquer aresta incidente no vértice que corresponde àquela barra. Na escolha adequada desta associação de medidas de injeção é que reside a principal dificuldade para a determinação da observabilidade topológica.

2.4.3. Observabilidade Topológica e Observabilidade Algébrica

Com as definições acima pode-se finalmente definir observabilidade topológica:

Um sistema de potência é topologicamente observável com respeito a um conjunto de medidas M se existir uma árvore geradora observável do grafo da rede do sistema com respeito a M.

A conexão entre observabilidade topológica e observabilidade algébrica, isto é, entre a existência de uma árvore geradora observável no grafo da rede e o posto da matriz Jacobiana, é feita através dos seguintes teoremas, provados por Krumholz, Clements e Davis (1980):

TEOREMA 1

Se um sistema de potência é algebricamente observável com respeito a um plano de medição M, então ele é também topologicamente observável com respeito a M.

TEOREMA 2

Considere que um sistema de potência é topologicamente observável com respeito a M. Caso os vetores correspondentes às impedâncias-série das linhas de transmissão do sistema não tenham seus extremos sobre uma determinada superfície C de dimensão n-1, então o sistema é algebricamente observável com respeito a M.

Observa-se que o Teorema 2 não afirma, a rigor, que a observabilidade topológica implica na observabilidade algébrica (a recíproca é garantida pelo Teorema 1). A ressalva feita no enunciado, contudo, diz respeito a uma combinação fortuita dos valores das impedâncias das linhas do sistema, de ocorrência bastante improvável na prática.

Deste modo, a investigação da observabilidade algébrica será vista aqui como equivalente à determinação da observabilidade topológica, isto é, à busca de uma árvore geradora observável no grafo da rede.

3. UM ALGORITMO PARA A DETERMINAÇÃO DA OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA

Esta seção trata de um algoritmo combinatorio para a determinação da observabilidade topológica. O algoritmo em questão é derivado do trabalho de Quintana, Simões Costa e Mandel (1982) sendo entretanto aqui apresentadas algumas importantes modificações que, ao serem introduzidas no algoritmo original, conduzem a uma significativa redução do seu tempo de execução. Isto é feito, entretanto, sem comprometimento das propriedades que asseguram a correção dos resultados, as quais são devidas à sólida base teórica do método.

3.1. Formulação do Problema em Termos do Grafo de Medição

O método é baseado na formulação do problema de observabilidade topológica em termos do grafo de medição do sistema, Z, associado a um dado plano de medição M, cujos vértices e arestas são assim definidos:

- 1) Os vértices de Z são os mesmos vértices do grafo de rede;
- 2) Se o fluxo na linha i-j é medido, então os vértices i e j em Z são conectados por uma aresta que será associada àquela medida de fluxo (aresta de fluxo);
- 3) Se a injeção na barra i é medida, o vértice i em Z será conectado a cada um de seus vértices adjacentes mediante arestas que serão todas associadas à medida de injeção (arestas de injeção).

O grafo de medição contém, portanto, todas as possíveis arestas que podem ser associadas às medidas em M. De posse deste grafo, o problema de determinação da observabilidade topológica poderá ser agora assim enunciado (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982):

Investigar a existência de uma árvore geradora no grafo de medição, com a restrição de que esta árvore não poderá conter mais do que uma aresta associada a uma dada medida.

Uma árvore com estas características é claramente uma árvore geradora observável do grafo da rede associada a M. O algoritmo proposto é capaz de encontrar tal árvore sempre que ela existir, assim como detecta prontamente os casos em que ela não existe.

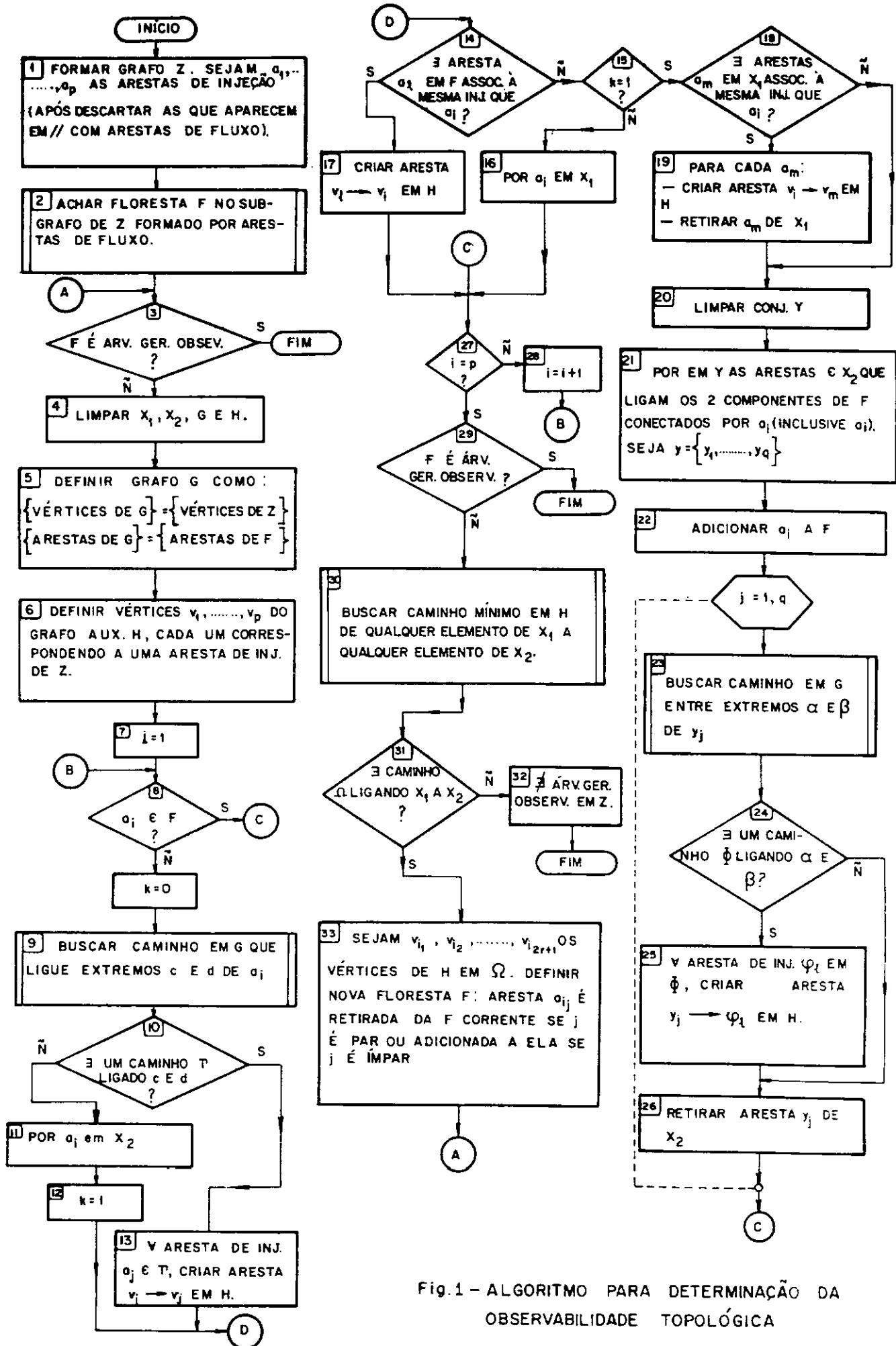


Fig.1 - ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DA OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA

3.2. Descrição Informal do Método

A Fig.1 apresenta o fluxograma do método proposto, que pode ser dividido em duas etapas:

- 1) Processamento de arestas de fluxo;
- 2) Processamento de arestas de injeção.

O processamento de arestas de fluxo é a parte mais simples do método, e consiste basicamente na busca de uma floresta observável F no subgrafo de Z formado apenas por arestas de fluxo (Bloco 2 da Fig.1). Existem algoritmos eficientes e bem conhecidos para este fim, como o de Kruskal (Swarcfiter, 1984). Se F for uma árvore geradora de Z , conclui-se que o sistema é topologicamente observável, sem a necessidade de se processar as medidas de injeção. Em caso contrário, F servirá de ponto de partida para a segunda etapa do algoritmo. As arestas de fluxo em F aparecerão como parte da floresta observável (ou árvore geradora observável, se existir) fornecida como resultado final do algoritmo, enquanto que as arestas de fluxo não utilizadas tampouco o serão nos passos seguintes, e podem ser descartadas.

Na segunda etapa, as arestas de injeção são examinadas individualmente, na tentativa de se expandir F . Trata-se, como já foi dito, da parte mais complexa do problema, uma vez que não se sabe "a priori" qual aresta dentre aquelas associada a uma dada medida de injeção, deve ser escolhida para propiciar a máxima expansão de F . A estratégia adotada pelo método para resolver este problema pode ser resumida no seguinte:

- 1) Adicionar uma aresta de injeção j à floresta F sempre que:
 - a) A aresta j não forma nenhum ciclo com os ramos da floresta F existente, e
 - b) Nenhuma aresta associada à mesma medida de injeção já está em F .
- 2) Se alguma das condições (a) ou (b) acima não forem satisfeitas, a aresta j não é definitivamente excluída de consideração, havendo ainda possibilidade de ser posteriormente aproveitada. Isto porque a inclusão de j em F foi ditada meramente por uma questão de ordem de processamento, que pode não levar à escolha mais adequada para a expansão de F .

Para prever a possibilidade de remanejamento das arestas de injeção incluídas em F , um grafo auxiliar H é sistematicamente construído ao longo de todo o processamento das medidas de injeção. As arestas de H são direcionadas, e além disso H é um grafo bipartite (ou seja, é possível se particionar o seu conjunto de vértices V em dois subconjuntos, V_1 e V_2 , tais que toda aresta de H une um vértice de V_1 a outro de V_2), (Swarcfiter, 1984). O conjunto V de vértices de H é definido de modo que cada vértice corresponda a uma aresta de injeção (Bloco 6). V_1 é o conjunto dos vértices que correspondem às arestas de injeção que estão em F , e $V_2 = V - V_1$. As arestas de H vão sendo criadas no decorrer do processamento de medidas de injeção (ver Blocos 13, 17, 19 e 25 na Fig.1). A Fig.2 mostra um exemplo de grafo auxiliar H .

Assim como o grafo H , os conjuntos X_1 e X_2 também são formados ao longo do processamento das medidas de injeção (Blocos 11, 16, 19, 26), sendo definidos como:

$$X_1 = \{ \text{arestas de injeção } a_i : a_i \notin F \text{ e não existe nenhuma aresta em } F \text{ associada à mesma injeção que } a_i \}$$

$$X_2 = \{ \text{arestas de injeção } a_i : a_i \notin F \text{ e } a_i \text{ forma o único caminho entre seus vértices terminais} \}$$

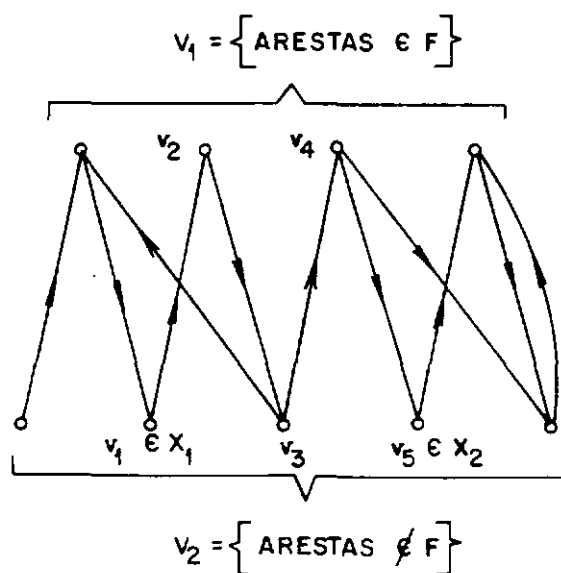


Fig. 2 - Exemplo de Grafo Auxiliar H

Observa-se que nem os elementos de X_1 nem os de X_2 estão na floresta F corrente, correspondendo portanto a vértices do conjunto V_2 do grafo H . Pode-se também verificar das definições que os elementos de ambos os conjuntos gozam de propriedades que os tornam fortes candidatos a entrarem na floresta F , em caso de haver necessidade de se remanejar arestas.

Se ao cabo do processamento de todas as arestas de injeção verificar-se que não foi encontrada uma árvore geradora observável, o grafo H é finalmente utilizado com o objetivo de aumentar a floresta corrente (Blocos 30 a 33 da Fig.1). Trata-se de achar um caminho entre qualquer elemento de X_1 e qualquer elemento de X_2 , mas de forma que ele contenha o menor número possível de arestas. Para ilustrar este procedimento, considere na Fig.2 que o caminho mínimo liga os vértices v_1 , pertencente a X_1 , e v_5 , que pertence a X_2 , sendo portanto formado pelos vértices v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 . É possível provar que este caminho mínimo terá sempre um número ímpar de vértices, e o número de vértices que correspondem às arestas que não estão em F (no exemplo, v_1, v_3 e v_5) excederá sempre de 1 o número de vértices que estão em F (v_2 e v_4).

Para aumentar de uma aresta a floresta F , o algoritmo então preconiza (Bloco 33) que as arestas do caminho mínimo que pertencem à floresta Z sejam substituídas por aquelas que não fazem parte da floresta corrente (no exemplo da Fig.2, v_2 e v_4 seriam substituídas em F por v_1, v_3 e v_5). Se o incremento assim obtido não for suficiente para transformar F em uma árvore geradora observável, o algoritmo reprocesa as arestas de injeção, mas agora a partir da nova floresta.

Em caso da não-existência do caminho mínimo entre elementos de X_1 e X_2 no grafo H , é possível se afirmar que:

- (1) O grafo Z não possui uma árvore geradora observável, e
- (2) A floresta observável corrente é máxima.

3.3. Modificações Introduzidas no Algoritmo Original

Esta sub-seção descreve as modificações aludidas no item 3.1, que visam melhorar a eficiência computacional do método proposto.

A primeira modificação parte da constatação de que é comum, na geração do grafo de medição Z , o aparecimento de arestas de injeção em paralelo com arestas de fluxo. Dada a prioridade atribuída pelo algoritmo ao processamento das arestas de fluxo, verifica-se que não é possível que tais arestas de injeção venham a fazer parte da máxima floresta observável final. Tratou-se portanto de evitar a sua criação quando da formação de Z , conforme indicado no Bloco 1 da Fig.1. O resultado é uma redução do número de arestas de injeção a serem processadas na segunda parte do algoritmo, com um consequente aumento de eficiência computacional.

A segunda alteração tem impacto muito maior na redução do tempo de execução do método. Em sua versão original, o algoritmo preconiza, após a saída do bloco 15 da Fig.1, no caso de $k=1$, a inclusão de aresta a_i em F e o retorno ao bloco 3 (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982). Isto significa a reinicialização dos grafos G e H e dos conjuntos X_1 e X_2 e o reinício de todo o processamento de medidas de injeção, a partir da aresta a_i .

Na versão apresentada na Fig.1, adota-se o procedimento de modificar os grafos e conjuntos acima aludidos ao invés de reinicializá-los. Estas modificações, representadas pelos blocos 18 a 26 da Fig.1, permitem que, pelo aproveitamento de resultados anteriormente obtidos, o processamento das medidas de injeção seja retomado a partir da aresta a_{i+1} . Evita-se assim várias chamadas das rotinas que requerem maior número de operações, resultando em um significativo ganho em termos de tempo de execução.

4. ALGUNS PROBLEMAS CORRELATOS

O desenvolvimento da teoria da observabilidade topológica contribuiu de maneira significativa para a solução de outros sub-problemas da estimação de estados, dentre os quais destacam-se o processamento de erros grosseiros e a estimação de estados de sistemas com planos de medição deficientes. No primeiro caso, os conceitos de medidas e pares críticos, originalmente introduzidos em conexão com algoritmos baseados na topologia da rede, são hoje reconhecidos como relevantes na identificação de medidas espúrias. No segundo, a obtenção da máxima floresta observável, no caso de não-observabilidade da rede, permite a alocação de pseudomedidas de modo a restabelecer a ob-

servabilidade do sistema global ou, alternativamente, a estimação dos estados dos componentes observáveis.

4.1. Medidas e Pares Críticos

Uma medida é crítica se, quando suprimida do conjunto de medidas M , torna o sistema não-observável (Clements, Krumpholz e Davis, 1981). Pares Críticos, por outro lado, são conjuntos de duas medidas tais que a remoção de uma delas de M torna a medida remanescente crítica (Clements, 1984).

A correta identificação de medidas e pares críticos é certamente importante no estágio de projeto do plano de medição, pois a sua existência indica quais os pontos onde o sistema de medição deve ser reforçado, sob pena de redução da confiabilidade. É contudo igualmente importante o seu reflexo sobre os resíduos normalizados, e consequentemente sobre os métodos de identificação de erros grosseiros. Prova-se, por exemplo, que medidas críticas apresentam tanto o resíduo quanto a variância correspondentes iguais a zero. Isto torna impossível o cálculo do resíduo normalizado, o que, em decorrência, implica na não-identificabilidade das medidas críticas (Clements, Krumpholz e Davis, 1981). Quanto aos pares críticos, é igualmente possível mostrar-se que, se uma medida pertence a um ou mais desses pares, o seu resíduo normalizado será igual aos de todas as outras medidas com as quais ela forma um par crítico, o que da mesma forma dificulta o procedimento de identificação (Clements, 1984).

A disponibilidade de técnicas de determinação de medidas e pares críticos é essencial para os métodos de identificação de erros grosseiros múltiplos em que as medidas espúrias são obtidas de uma lista maior de medidas suspeitas. Isto porque, se uma medida ou par crítico está presente nesta lista, isto implicará na singularidade de certas matrizes de covariância cuja inversa é requerida por estes métodos (Mili, Van Cutsem e Ribbens-Pavella, 1984).

Dada uma árvore geradora observável de um sistema de N barras, um método possível para a determinação das medidas críticas presentes em M consiste em se retirar uma a uma as medidas associadas a arestas da árvore (já que, se houver uma medida crítica, ela forçosamente estará associada a uma aresta da árvore geradora observável), usando-se então a definição. Tendo-se en-

contrado o conjunto de medidas críticas do sistema, um procedimento similar poderia ser utilizado para obter os pares críticos. Tais métodos são contudo enumerativos, e podem por isso requerer um tempo de execução inviável. Para os métodos de determinação da observabilidade baseados em cálculos em ponto flutuante, as propriedades dos resíduos associados a medidas e pares críticos poderiam ser utilizadas.

Uma abordagem mais prática é a de se entender os métodos de análise de observabilidade existentes para propiciar a determinação de medidas críticas. Isto foi feito por Clements, Krumpholz e Davis (1981) com respeito ao seu algoritmo de observabilidade previamente proposto (1980). A extensão do método apresentado na Seção 3 com a mesma finalidade é igualmente viável, sendo atualmente objeto de investigações por parte dos autores.

4.2. Estimação de Estados para Sistemas com Planos de Medição Deficientes

Se um sistema é não-observável com respeito a um dado plano de medição M , o método combinatório apresentado na Seção 3 fornecerá a máxima floresta observável F do sistema, em geral composta de vários componentes conexos. O objetivo desta seção é indicar como esta informação pode ser utilizada para a estimação de estados do sistema.

O caso mais simples é aquele em que há interesse em se estimar os estados do subsistema correspondente a um dado componente conexo de F , ou seja, de uma das ilhas observáveis do sistema. Para esta situação, Broussolle e Le Roy (1982) sugerem um procedimento que visa essencialmente a recuperação artificial da observabilidade, pela criação de pseudomedidas da injeção nas barras de todos os demais componentes de F (daqui para a frente referidos como "sistema externo"). É entretanto necessário se descartar todas as medidas existentes no sistema externo. As medidas da injeção nas barras de fronteira, ou medidas irrelevantes (Monticelli e Wu, 1985a), devem também ser desconsideradas. Com isto, as pseudomedidas de injeção no sistema externo serão críticas, assegurando que, independentemente dos valores adotados, os seus erros não contaminarão as estimativas para os estados da ilha observável em questão (já que os resíduos de medidas críticas são nulos). Se não se tem nenhuma informação sobre as in-

jeções no sistema externo, e valores arbitrários (zero, por exemplo) são adotados para as pseudomedidas, os fluxos de potência na rede externa não terão qualquer significado real, mas os fluxos na ilha observável serão estimados corretamente (desde que, naturalmente, as medidas correspondentes não sejam portadoras de erros grosseiros).

Na verdade, não é estritamente necessário que todas as medidas do sistema externo sejam descartadas, como preconizam Broussolle e Le Roy (1982). O ponto importante é assegurar que qualquer pseudomedida utilizada seja crítica, de modo que os estados das ilhas observáveis não sejam afetados.

A alocação de pseudomedidas obedecendo a estes princípios tem sido abordada segundo diversos pontos de vista na literatura (Clements, Krumpholz e Davis, 1983; Monticelli e Wu, 1985a; Simões Costa e A. dos Santos, 1985). Torna-se assim possível generalizar o procedimento anteriormente descrito, propiciando a estimação dos estados do sistema como um todo.

Uma alternativa para o tratamento de sistemas não-observáveis é a estimação dos estados de cada ilha observável, após terem sido eliminadas as medidas irrelevantes. Isto exige a escolha de ângulos de tensão de referência em cada ilha observável, no caso P- δ . No caso Q-V, procedimento similar pode em certas situações ser adotado, atribuindo-se arbitrariamente um valor de módulo de tensão em cada ilha observável que não apresente medida de tensão. Tal procedimento se aplica quando for possível ignorar a presença de capacitores e reatores em derivação para a terra. Em caso contrário, será necessário que cada ilha observável apresente pelo menos uma medida de tensão (Clements, Krumpholz e Davis, 1982).

5. TESTES E RESULTADOS

Apresentam-se nesta seção alguns resultados da aplicação do método descrito na seção 3 a três diferentes sistemas, cujas características e planos de medição são dados abaixo:

Sistema IEEE de 14 barras e 20 linhas - IEEE-14 (Krumpholz, Clements e Davis, 1980) - São medidas as injeções de potência em todas as barras e não são consideradas medidas de fluxo. Em termos de tempo de execução, trata-se de um plano de medição

bastante severo para testar o método, uma vez que requer o processamento de todas as medidas de injeção.

Sistema IEEE de 30 barras e 41 linhas - IEEE-30 (Stagg e outros, 1970) - Foram novamente consideradas medidas de injeção em todas as barras do sistema, além de 12 medidas de fluxo.

Sistema Eletrosul-Celesc de 121 barras e 133 linhas - ESUL121 (Quintana, Simões Costa e Mandel, 1982), com 71 medidas de injeção e 59 medidas de fluxo.

Os testes consistiram em, a partir dos planos de medição considerados, e para os quais os três sistemas são observáveis, retirar uma a uma as medidas associadas aos ramos das árvores geradoras observáveis correspondentes. Este é um procedimento enumerativo para identificar medidas críticas. Incluindo o caso base, são portanto executados N casos para cada sistema-teste. Os tempos de execução são computados, e o resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela I.

TABELA I - Tempos de Execução do Método para Determinação da Observabilidade

Sistema-Teste	No. de Casos	Tempo Mín(s)	Tempo Máx(s)	Tempo Médio(s)
IEEE-14	14	0,036	0,06	0,046
IEEE-30	30	0,083	0,12	0,098
ESUL121	121	0,84	1,48	1,21

Os programas que implementam o algoritmo da Seção 3 foram executados no computador IBM 4341 da UFSC, tendo sido utilizado o compilador FORTRAN G. Tempos de execução bem mais favoráveis seriam obtidos se fossem usadas outras versões do compilador FORTRAN, como o FORTRAN H ou o FORTRAN H Es tendido. Não obstante este fato, os resultados confirmam a expectativa de que o método proposto para a determinação da observabilidade topológica é compatível com as exigências de tempo de cálculo impostas pela operação em tempo real de sistemas de potência.

6. CONCLUSÕES

Após uma ampla revisão da teoria de observabilidade de sistemas de potência, as atenções foram concentradas na abordagem topológica para o problema. A partir da formulação baseada na definição do grafo de medição, a questão da observabilidade topológica finalmente reduz-se à existência ou não de uma árvore geradora deste grafo tal que não existam duas de suas arestas associadas à mesma medida. É então apresentado um algoritmo para busca desta árvore geradora observável no grafo de medição.

O método proposto caracteriza-se pela correção dos resultados (que pode ser matematicamente provada), pela rapidez de execução, resultante da não utilização de cálculos em ponto flutuante, e por fornecer resultados que podem, em caso de não observabilidade, ser utilizados para a definição das ilhas observáveis e para a alocação de pseudomedidas que propiciem a recuperação artificial da observabilidade do sistema.

Problemas como a determinação de medidas e pares críticos, de grande interesse para o processamento de erros grosseiros múltiplos, podem também ser resolvidos a partir de algoritmos combinatórios que visam primariamente a determinação da observabilidade. A extensão do método proposto neste artigo com vistas a atingir este objetivo é objeto de pesquisa ora em andamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allemon, J.J. & Irisarri, G.D. & Sasson A.M. (1980). "An Examination of Solvability for State Estimation Algorithms", apresentado no 1980 IEEE PES Winter Meeting, Artigo No. A80 0008-3, New York.
- Ariatti, F. & Marzio, L. & Ricci, P. (1975). "Designing State Estimation in View of Reliability", Proc. 5th.PSCC, Cambridge, U.K., Artigo No. 2.3/8
- Bargiela, A. & Irving, M.R. & Sterling, M.J.H. (1986). "Observability Determination in Power System State Estimation Using a Network Flow Technique", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-1, No.2: 108-114.
- Broussole, F. & Le Roy, A. (1982). "Estimation D'Etat et Reseaux Non-Observables", E.D.F.Bulletin de La Direction Des Etudes et Recherches, No.4: 5-9.
- Clements, K.A. & Wollenberg, B.F. (1975). "An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation", IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, California, Artigo A-75 447-3.
- Clements, K.A. & Krumpolz, G.R. & Davis, P.W. (1981). "Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm using Network Topology", IEEE Trans. on Pas, Vol. PAS-100, No.4: 1779-1787.
- Clements, K.A. & Krumpolz, G.R. & Davis, P.W. (1982). "Power System State Estimation With Measurement Defficiency - An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork", IEEE Trans. on Pas, Vol. PAS-101, No.9: 3044-3052.
- Clements, K.A. & Krumpolz, G.R. & Davis, P.W. (1983). "Power System State Estimation With Measurement Defficiency - An Observability-Measurement Placement Algorithm", IEEE Trans. on Pas, Vol. PAS-102, No.7: 2012-2020.
- Clements, K.A. (1984) Discussão de (Mili, Van Cutsem e Ribbens-Pavella, 1984).
- Edelmann, H. (1975) "A Universal Assessment of the Superior Quality of Distribution of Measuring Points for the State Estimation of High-Voltage Network", Proc. PSCC, Cambridge, U.K., Paper No.2.3/7.
- Fetzer, E.E. & Anderson, P.M. (1975) "Observability in the State Estimation of Power Systems", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94: 1981-1988.
- Golub, G.H. & Klema, V.C. & Stewart, G.W. (1976) "Rank Degeneracy and Least Squares Problems", Tech. Rep. STAN-CS-76-559, Dept. Comp. Science, Stanford University.
- Handschin, E. & Bongers, C. (1975) "Theoretical and Practical Considerations in the Design of State Estimators for Electric Power Systems" Real Time Control of Electric Power Systems, E. Handschin, Ed., Elsevier, pp. 104-136.
- Horisberger, H.P. (1985) "Observability Analysis for Power Systems with Measurements Defficiencies", Proc. of IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems, Rio de Janeiro, pp. 51-58.

- Horton, J.S. & Masiello, R.D. (1977) "On-Line Decoupled Observability Processing", PICA Proc., Toronto, Ontario, pp. 420-426.
- Krumpholz, G.R. & Clements, K.A. & Davis, P.W. (1980) "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99: 1534-1542.
- Machado, P.A. & Gorenstin, B.G. (1981) "Observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência Incluindo Tap de Transformadores", Anais do VI SNPTEE, Balneário Camboriú, SC.
- Mili, L. & Van Cutsem, T. & Ribbens-Pavella, M. (1984) "Hypothesis Testing Identification: A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-103, No. 11: 3239-3252.
- Monticelli, A. & Wu, F.F. (1985a) "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No.5: 1042-1048.
- Monticelli, A. & Wu, F.F. (1985b) "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No.5: 1035-1041.
- Monticelli, A. & Wu, F.F. (1986) "Observability Analysis for Orthogonal Transformation Based State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRs-01: 201-208.
- Murari, C.A. (1986) "Método Híbrido para a Estimação de Estado e Análise de Observabilidade de Sistemas de Potência", Tese de Doutorado, UNICAMP.
- Phua, K. & Dillon, T.S. (1977) "Optimal Choice of Measurements for State Estimation", PICA Proc., Toronto, Ontario, pp. 431-441.
- Quintana, V.H. & Simões Costa, A. (1981) "Topological Observability of Power System Networks by the Matching Method", Apresentado no 1981 European Conference on Circuit Theory and Design, Haia, Holanda.
- Quintana, V.H. & Simões Costa, A. & Mandel, A. (1982) "Power System Topological Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach" IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No.3: 617-626.
- Schweppe, F.C. & Rom, D.B. (1970) "Power System Static State Estimation, Part II: Approximate Model", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, No.1: 125-130.
- Schweppe, F.C. & Wildes, J. (1970) "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, No.1: 120-125.
- Simões Costa, A. & Alfaya dos Santos, E. (1985) "Observabilidade de Sistemas de Potência: Expansão de Subsistemas Observáveis Usando Métodos Combinatórios", apresentado no VI Congresso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Santiago do Chile.
- Stagg, G.H. & Dopazo, J.F. & Klitin, O. A. & Van Slyck (1970) "Techniques for the Real Time Monitoring of Power System Operations", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-85, No. 4545-555.
- Szwarcfiter, J.L. (1984). Grafos e Algoritmos Computacionais. Editora Campus, Rio de Janeiro.
- Van Cutsem, T. & Gailly, P.J. (1983) "A Simple Algorithm for Power System Observability Analysis and Related Functions", IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security, Florença.