

UM MÉTODO COMBINATÓRIO PARA SELEÇÃO DE PSEUDOMEDIDAS CRÍTICAS NA MODELAGEM EXPLÍCITA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA INTERLIGADOS

Marcelo J. T. Arze Antonio J. A. Simões Costa
Universidade Federal de Santa Catarina
CTC / EEL CP 476 Florianópolis - SC Brasil

Resumo: Este trabalho propõe um método combinatório para selecionar pseudomedidas e informações críticas que modelam explicitamente o Sistema Externo, com o objetivo de realizar posteriormente a Análise de Segurança de Sistemas de Potência interconectados em tempo-real. O uso de pseudomedidas e informações críticas para o Sistema Externo evita a introdução de erros nas estimativas dos estados para o Sistema Interno por imprecisões inerentes aos dados provenientes de outras concessionárias de energia elétrica. Uma característica importante do método proposto e a grande flexibilidade para a adoção dos critérios de seleção das pseudomedidas, que podem assim ser deixados a juízo do usuário. O método é testado através de simulações realizadas com os sistemas-teste de 14 barras do IEEE e de um sistema de 48 barras que faz parte da rede interligada do sul do Brasil.

Palavras-Chaves: Monitoração em Tempo Real de Sistemas de Potência; Análise de Segurança em Tempo Real; Estimação de Estados em Sistema de Potência.

Abstract: A combinatorial method for critical pseudomeasurement selection in real time to model an unreduced External System for Power System Contingency Analysis is introduced. The critical pseudomeasurements of the External System do not affect the Internal State Estimation. An important feature of the proposed algorithm is the flexibility to allow user-defined criteria for pseudomeasurement selection. The 14-bus IEEE test system and a reduced 48-bus equivalent system for the Southern Brazil Interconnected Network are employed to test the method.

Keywords: On-Line Security Analysis; External Network Modeling; State Estimation Contingency Analysis.

⁰ Artigo submetido em 02/02/94;

1^a Revisão em 08/03/94 2^a Revisão em 26/04/94

Aceito por recomendação do Ed. Consultor Prof. Dr. Rafael Santos Mendes

1 INTRODUÇÃO

Entre as diversas funções implementadas em um Centro de Operação de Sistemas (COS), a Análise de Segurança é a que melhor identifica a moderna filosofia de operação de sistemas de potência. A avaliação da segurança do sistema é realizada via Análise de Contingências que, por sua vez, requer a existência de um modelo que represente adequadamente o Sistema Externo (SE) frente a contingências simuladas no próprio sistema, isto é no Sistema Interno (SI).

A modelagem do SE pode ser feita através de equivalentes externos ou mediante a representação explícita de sua topologia integral. Os métodos que usam equivalentes externos reduzem, através de estudos "off-line", a rede do SE e a acoplam ao SI, atualizando em tempo real o equivalente com o intuito de acompanhar o ponto de operação do sistema. Os equivalentes têm a vantagem de serem modelos reduzidos, porém sua utilização traz algumas desvantagens, tais como a criação de admitâncias equivalentes atípicas e a necessidade de calibrações e de obtenção de novos equivalentes frente a mudanças topológicas no SE. Uma ampla revisão dos métodos que modelam o SE através de equivalentes externos pode ser encontrada em Deckmann *et alii* (1980), em Deckmann *et alii* (1980a) e em Wu & Monticelli (1983).

As dificuldades encontradas na modelagem do SE através de equivalentes levou ao desenvolvimento de métodos de representação explícita do SE, nos quais a rede externa é representada por meio de sua topologia integral. Internacionalmente, esta última abordagem vem sendo atualmente favorecida pela crescente tendência de intercâmbio de informações entre concessionárias de energia elétrica (Dabaghchi & VanSlyck, 1986).

A Seção 2 deste artigo apresenta uma rápida revisão dos

métodos que modelam explicitamente o SE. A Seção 3 introduz a teoria matemática básica do método proposto. Os algoritmos para a implementação do método são descritos na Seção 4, e na Seção 5 são discutidos alguns critérios para a seleção de pseudomedidas críticas do SE. A Seção 6 apresenta resultados da Análise de Contingências para dois sistemas-teste. Finalmente, na Seção 7 encontram-se as conclusões deste trabalho.

2 MODELAGEM EXPLÍCITA DO SE

A modelagem explícita do SE pode ser realizada através da execução de rotinas de fluxo de potência ou mediante o uso de um programa de estimação de estados (Deckmann, 1980; Geisler & Bose, 1983; IEEE, 1993). Ambas as abordagens necessitam de informações, telemidas e/ou pseudomedidas, referentes ao SE. A precisão e qualidade do modelo resultante dependerá portanto da qualidade das informações do SE usadas na modelagem e da técnica adotada para tal efeito.

Os métodos baseados em fluxo de potência para modelar o SE requerem inicialmente a estimação de estados do SI, para em seguida executar o fluxo de potência para o SE. Nesta abordagem, todas as barras de fronteira são consideradas barras de folga. Este último fato constitui uma das desvantagens do método, já que as barras de folga na fronteira absorvem os erros da modelagem do SE. Isto muitas vezes se reflete em grandes desvios de potência nas barras de fronteira do SI (Geisler & Bose, 1983; Bose, 1986).

Os métodos que usam a estimação de estados têm a vantagem de utilizar não só uma técnica mais flexível de solução, mas também outras informações valiosas, tais como fluxos nas linhas do SE e diferentes e variados esquemas de medição (Geisler & Bose, 1983; Monticelli & Wu, 1985). Isto não é possível quando se emprega a abordagem via fluxo de potência. Estes métodos podem ser classificados em métodos que usam duas estimatórias de estado ("Two-Pass") e os que usam uma só estimatória de estados ("One-Pass") para o sistema global (SI+SE) (Bose & Clements, 1987; IEEE, 1993). Os que usam duas estimatórias executam primeiro a estimatória para o SI, para em seguida realizá-la para o SE (Geisler & Bose, 1983), ou para o sistema global (Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993). Existem também algumas variantes que executam um fluxo de potência como passo intermediário entre as duas estimatórias de estado (Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993).

É importante lembrar que a modelagem do SE é aplicada essencialmente para dar suporte a funções tais como Análise de Contingências, e que o modelo externo não é necessário para a estimação de estados do próprio sistema (SI). Portanto, a agregação do modelo externo não deve introduzir erros na modelagem do SI. Isto constitui um dos principais objetivos dos métodos que usam a estimação de estados para modelar o SE. Uma das maneiras de evitar a contaminação dos estados do SI pela modelagem externa é atribuir diferentes fatores de peso aos elementos da matriz de covariâncias correspondentes às telemidas, pseudomedidas e informações do SE (Geisler & Bose, 1983; Bose, 1984; Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993). A atribuição de pesos

é feita em função da qualidade das informações do SE, com a finalidade de dispersar os erros da modelagem em direção às partes eletricamente mais afastadas do SE (Bose, 1984; Bose, 1986; IEEE, 1993). Infelizmente, esta dispersão tem sido obtida via manipulação *heurística* dos pesos das pseudomedidas (Geisler & Bose, 1983; Geisler & Tripathi, 1985; Lu *et alii*, 1990). Isto pode se traduzir numa grande disparidade de fatores de peso (Geisler & Bose, 1983; Lu *et alii*, 1990) o que é uma fonte bem conhecida de instabilidade numérica para os algoritmos de estimação de estado (Lu *et alii*, 1990; Holten *et alii*, 1988).

Uma maneira alternativa de evitar a contaminação dos estados do SI sem a necessidade de manipulação dos fatores de peso é apresentada em (Monticelli & Wu, 1985) para os métodos baseados em uma única execução da estimação de estados. A estratégia proposta utiliza pseudomedidas não redundantes para modelar o SE, de modo a evitar a contaminação dos estados do SI. Isto é decorrente das propriedades das medidas críticas (Krumpholtz *et alii*, 1980; Simões Costa *et alii*, 1990), que garantem que os estados estimados para o sistema composto pelo SI e modelo do SE são os mesmos que seriam obtidos se fosse feita a estimatória de estados somente levando em conta o SI. Embora esta alternativa seja mais atraente, é ainda fundamental que o conjunto de pseudomedidas críticas que modelam o SE seja o mais confiável, dentre os vários possíveis, para a obtenção de um modelo preciso do SE. Em (Monticelli & Wu, 1985) por exemplo, o conjunto de pseudomedidas críticas usado é restrito a "medidas do tipo fluxo de potência", isto é, injeções de potência nas barras de carga e tensões especificadas nas barras de geração. Isto exclui algumas informações valiosas que podem estar disponíveis, tais como telemidições de fluxo nas linhas, etc. Por outro lado, permanece outra fonte de instabilidade numérica que decorre do processamento quase exclusivo de medidas de injeção (Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993).

As limitações acima mencionadas podem ser eliminadas se for possível selecionar, dentre todas as informações disponíveis do SE, um conjunto de pseudomedidas não redundantes cuja característica seja o alto grau de confiança. Isto permitirá que o estimador processe não só medidas de injeção, mas também medidas de fluxo, além de quaisquer outras informações disponíveis sobre o SE.

No presente trabalho, é proposto um método para selecionar informações não redundantes do SE. Uma característica importante do método é a flexibilidade de permitir ao usuário a adoção de critérios de seleção segundo suas necessidades e as características do intercâmbio de informações com os sistemas adjacentes. Por exemplo, é possível realizar a seleção de pseudomedidas pelo tipo de medida, tipo de barra a que pertence a medida, mínima defasagem de varreduras, etc.

A apresentação do trabalho enfatiza a aplicação do método de seleção à modelagem do SE através de uma única estimatória de estados. No entanto, é possível estendê-lo para aplicação em conjunto com métodos que usam duas estimatórias de estados.

3 MÉTODOS COMBINATÓRIOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Várias aplicações recentes de técnicas combinatórias a sistemas de potência têm sido relatadas na literatura. Estas aplicações têm produzido métodos atraentes tanto por sua eficiência computacional quanto pela sólida base matemática, além da possibilidade de fornecer valiosas informações adicionais (Krumpholz *et alii*, 1980; Quintana *et alii*, 1982; Van Cutsem & Gailly, 1983; Simões Costa *et alii*, 1990). As técnicas combinatórias aplicadas neste artigo têm como base matemática a teoria de matróides. Aplicações anteriores desta teoria à estimação de estados em sistemas de potência incluem métodos eficientes para a análise de observabilidade (Quintana *et alii*, 1982) e para a identificação de medidas e conjuntos críticos (Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990). Neste trabalho é proposta uma nova aplicação do mesmo método combinatório para selecionar pseudomedidas não-redundantes que modelam explicitamente o SE.

No que se segue, pressupõe-se alguma familiaridade com conceitos básicos da teoria de grafos e da teoria de observabilidade de sistemas de potência.

3.1 Notação e Definições Básicas

- Um conjunto I de arestas de um grafo é *independente* se seus elementos, no caso arestas, não formam caminhos fechados. Um conjunto independente composto de k arestas é denotado por I^k . Em termos da teoria de grafos, o conjunto independente acima definido é chamado de *floresta*.
- Um grafo ponderado $G_p(V, \mathcal{E})$ é formado por um conjunto de elementos $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ chamados vértices e outro conjunto $\mathcal{E} = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, cujos elementos são chamados de arestas, sendo que a aresta e_k é identificada por um par de vértices v_i, v_j e por um peso $s(e_k)$ a ela associado.
- Seja um sistema de potência e um conjunto de medidas M . A partir deles é possível definir o *grafo de medição da rede* (G_m) (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990), onde cada medida de fluxo cria uma aresta em G_m , enquanto que uma medida de injeção cria l arestas, onde l é o número de linhas de transmissão incidentes na barra monitorada. Se a cada aresta do grafo G_m são associados pesos, então o grafo G_m se torna um *grafo ponderado de medição*.
- Uma *máxima árvore geradora* é aquela cuja soma dos pesos das arestas que a compõem é máxima entre todas as árvores geradoras possíveis de um grafo ponderado. Uma árvore geradora de G_m é uma *árvore geradora observável com respeito a M* (AGO) se e somente se for possível associar uma medida de ramos, sem que existam dois ramos associados à mesma medida (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990). Uma *máxima árvore geradora observável* é aquela cuja soma dos pesos de suas arestas é máxima.

- Finalmente, um sistema de potência é *topologicamente observável* com respeito a um conjunto de medidas M , se existe uma árvore geradora observável em G_m . Portanto, determinar a observabilidade topológica de um sistema de potência equivale a achar uma árvore geradora observável em G_m (Krumpholz *et alii*, 1980; Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990).

3.2 Fundamentos da Técnica Combinatória

Os fundamentos da técnica combinatória aplicada neste trabalho estão relacionados à noção axiomática de independência apresentada no começo da sub-seção anterior. Aquela definição, aplicada a grafos, resulta em conjuntos de arestas que não formam caminhos fechados. É possível também demonstrar que a mesma noção de independência cumpre as propriedades exigidas para a definição de matróides (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990). Neste artigo, o interesse está voltado à aplicação dos conceitos de independência ao grafo de medição G_m . A noção de independência acima mencionada é portanto aplicada a um conjunto \mathcal{E} de arestas de G_m , o que leva à definição do matróide \mathcal{M}_1 , denominado *matróide do grafo*.

Outras noções de independência igualmente úteis podem ser introduzidas neste contexto, como por exemplo aquela relacionada a *conjuntos de representantes distintos* das medidas em M . Para melhor compreensão, suponha que a cada medida de M é atribuída uma cor diferente, e que cada aresta de G_m é pintada com a cor da medida de M à qual é associada. Assim, uma medida de injeção pode produzir várias arestas da mesma cor, enquanto que uma medida de fluxo produz uma única aresta com a "cor" da medida de fluxo associada. A partir destas considerações, um conjunto \mathfrak{F} de \mathcal{E} é considerado independente se não contém mais de uma aresta da mesma cor. Observe que esta nova definição de independência não leva em conta a distribuição topológica das arestas em G_m (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990). A partir dela, podemos definir um outro matróide \mathcal{M}_2 , denominado *matróide de partição*.

É possível agora estabelecer a conexão entre os conceitos de observabilidade topológica e os matróides \mathcal{M}_1 e \mathcal{M}_2 induzidos pelas duas definições de independência introduzidas acima. Não é difícil se concluir que a busca de uma árvore geradora observável em G_m é equivalente à determinação de um subconjunto de \mathcal{E} que contenha um número máximo de elementos e que seja *simultaneamente* independente em ambos os matróides \mathcal{M}_1 e \mathcal{M}_2 . Este problema é conhecido como *intersecção de matróides*, sendo possível encontrar na literatura, vários algoritmos eficientes para sua solução (Frank, 1981; Lawler, 1975). Em (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990) é descrita com detalhes uma versão especializada do algoritmo de intersecção de matróides proposto em Frank (1981), aplicada à determinação da observabilidade de sistemas de potência.

Na procura da AGO, algumas vezes apresentam-se situações nas quais é desejável priorizar, segundo algum

critério, as arestas de G_m (e portanto as medidas de M) a serem incluídas na árvore geradora observável. Estes critérios podem ser, por exemplo, baseados no tipo de medida, na priorização do uso de informações mais recentes, etc. É exatamente este o tipo de problema encontrado durante o processo de seleção de pseudomedidas não-redundantes do SE, e sua solução pode ser obtida utilizando-se uma extensão dos algoritmos apresentados em (Frank, 1981; Simões Costa *et alii*, 1990). Para isto, entretanto, as arestas de \mathcal{E} devem ser ponderadas segundo critérios de priorização estabelecidos pelo usuário. O problema a ser resolvido passa então a se denominar *intersecção de matrôides ponderados*. Seu objetivo principal é determinar um subconjunto de arestas de G_m que sejam independentes tanto em \mathcal{M}_1 quanto em \mathcal{M}_2 e que, adicionalmente, apresentem peso máximo. O algoritmo que resolve este problema é descrito na próxima seção.

4 BUSCA DA MÁXIMA ÁRVORE GERADORA OBSERVÁVEL

Nas referências (Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990) é apresentada uma descrição detalhada do algoritmo de intersecção de matrôides, o qual determina uma árvore geradora observável a partir do grafo de medição G_m . Este algoritmo básico parte de um conjunto independente inicial \mathfrak{S} , que pode conter a floresta observável (Piazza & Simões Costa, 1990), e procura adicionar novos elementos a \mathfrak{S} mediante o processamento de arestas de G_m que não fazem parte da floresta. São adicionados novos elementos a \mathfrak{S} se: (a) a aresta de G_m sob análise não forma caminhos fechados com as arestas da floresta contida em \mathfrak{S} , e (b) não existem em \mathfrak{S} arestas da mesma cor da aresta que está sendo analisada.

A finalidade do algoritmo básico é encontrar alguma AGO do sistema. Caso não exista nenhuma, o processamento é finalizado e é fornecida uma das florestas observáveis. Note que, no caso da análise de observabilidade, o algoritmo fornece qualquer das possíveis AGOs do sistema, pois não é provido de critérios que priorizem a inclusão de arestas na árvore. De fato, esta priorização é irrelevante em se tratando tão somente da análise de observabilidade topológica.

O mesmo não acontece no processo de seleção de pseudomedidas não-redundantes para modelagem do SE. Embora a aplicação do algoritmo anterior preencha o requisito da não-redundância, o mesmo não tem a flexibilidade de permitir o uso de critérios de priorização durante a seleção.

Felizmente, contudo, é possível generalizar o algoritmo básico para cumprir os requisitos adicionais acima mencionados. Um primeiro passo nesta direção é atribuir um peso a cada medida do sistema global (SI+SE), segundo os critérios de seleção pré-estabelecidos (ver Seção 5). Isto, por sua vez, induz a atribuição de pesos às arestas do grafo de medição, de modo que cada aresta de G_m terá o peso da medida a ela associada. O problema de seleção de pseudomedidas não-redundantes pode assim ser formulado como a busca de uma *máxima árvore geradora observável*. Os dados necessários para a formulação do problema são o conjunto de telemidas do SI, o conjunto de telemidas,

pseudomedidas e outras informações do SE e os pesos correspondentes associados a estas medidas. Se forem adotados critérios consistentes para a atribuição de pesos, é possível garantir que os dados que tornam observável o SE são os mais atuais e confiáveis.

A generalização do método de intersecção de matrôides consiste na introdução de um laço externo ao algoritmo básico. Em cada execução do laço interno (isto é, do algoritmo básico (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990) só são consideradas, para realizar a expansão da floresta observável, aquelas arestas cujos pesos correntes são os maiores. Se o conjunto de arestas selecionado não é suficiente para formar uma AGO, os pesos máximos são redefinidos pelo algoritmo de ponderação (Frank, 1981), e a busca da AGO é reiniciada. A redefinição dos pesos permite aumentar o número de arestas de G_m a serem processadas pelo laço interno, através da inclusão das arestas cujos pesos são imediatamente inferiores ao máximo anterior. Este mecanismo de "expansão controlada" do conjunto admissível de arestas assegura que árvore geradora observável fornecida pelo método será de máxima ponderação.

Após a determinação da máxima AGO, as pseudomedidas externas selecionadas, a serem usadas na estimação de estados global, serão aquelas associadas às arestas da árvore que foram criadas por medidas do SE.

Os principais passos do algoritmo podem ser sumarizados nas etapas descritas abaixo:

1. A partir dos pesos das medidas, previamente definidos, determine os pesos das arestas de G_m ;
2. Inicialize o conjunto \mathfrak{S} de arestas da floresta observável como um conjunto vazio;
3. Defina como possíveis arestas a serem consideradas na expansão da floresta corrente aquelas cujo peso é máximo.
4. Aplique o algoritmo básico (Quintana *et alii*, 1982; Piazza & Simões Costa, 1990; Simões Costa *et alii*, 1990) para expandir a floresta corrente, usando somente o conjunto corrente de arestas de peso máximo;
 - Verifique se a nova floresta observável é uma árvore geradora observável. Se este for o caso, a AGO será também máxima. vá para o passo 6;
 - Se a floresta resultante não é uma árvore geradora observável, vá para o passo 5;
5. Verifique se existem arestas de G_m que ainda não foram processadas.
 - Se assim for, redefina os pesos das arestas (Frank, 1981), de modo a incluir no conjunto admissível as arestas cujos pesos são imediatamente inferiores ao peso máximo corrente. Retorne ao passo 4;
 - Se não mais existirem arestas a serem processadas, pare, já que não é mais possível aumentar o conjunto admissível de arestas. Não existe uma AGO e o sistema de potência é não-observável.
6. (*Pós-processamento*) Determine o conjunto de pseudomedidas externas selecionadas, formado pelas pseudomedidas incidentes aos ramos "externos" da máxima árvore geradora observável.

Evitar a contaminação dos estados do SI é uma das principais metas na modelagem do SE. Uma técnica eficaz para se atingir este objetivo consiste em se utilizar na modelagem da SE apenas medidas não-redundantes, isto é, *críticas* (Krumholz *et alii*, 1980). Em contrapartida, é importante compreender que a ausência de redundância implica em que dados errôneos ou imprecisos do SE não serão filtrados durante a estimação de estados global. É portanto necessário realizar uma cuidadosa seleção das pseudomedidas externas, já que a qualidade do modelo externo dependerá fortemente da qualidade das medidas selecionadas.

O método apresentado para este propósito na seção 4 permite ao usuário a flexibilidade de adotar ponderações para as pseudomedidas de acordo com qualquer critério pré-determinado. O método proposto assegura que o conjunto de medidas não-redundantes selecionado é o melhor correntemente disponível em relação ao critério pré-estabelecido pelo usuário.

5.1 Ponderação das Medidas

É muito importante fazer uma clara distinção entre os pesos das medidas usados no processo de seleção e os *fatores de ponderação* relacionados às variâncias das medidas e utilizados nos algoritmos de estimação de estados. Há de fato motivo para confusão, já que ambos são usados no mesmo contexto. Por exemplo, alguns métodos que modelam o SE usam o ajuste dos fatores de ponderação relacionados às variâncias para reduzir o efeito da contaminação dos estados do SI por parte das medidas do SE (Geisler & Bose, 1983; Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993). Os pesos usados no presente artigo para a seleção de medidas, por outro lado, têm valores discretos (inteiros) e seu objetivo é estabelecer prioridades relativas visando a inclusão das telemidas e pseudomedidas no conjunto de dados não-redundantes do SE. No que se segue, são discutidas diretrizes para escolher os valores numéricos dos pesos para a seleção de medidas.

Um primeiro aspecto importante a ser compreendido é que os valores absolutos das ponderações individuais das medidas não são relevantes. O que realmente importa são os valores relativos destas ponderações, já que são estes que diferenciam os diversos patama confiança atribuídos aos dados disponíveis do sistema. Suponha, por exemplo, que estão disponíveis algumas pseudomedidas altamente confiáveis do SE, como por exemplo injeções nulas em barras de transferência, e que os demais dados do SE são menos precisos, existindo entre eles o mesmo nível de confiança. Portanto, os pesos a serem atribuídos às injeções nulas devem ser maiores que os associados às medidas restantes do SE, de modo a assegurar que as primeiras façam parte do processo de modelagem do sistema. Por exemplo, pode-se utilizar pesos iguais a 100 e 50 para as injeções nulas e para os dados restantes do SE, respectivamente. Esta seria uma escolha adequada, mas se fosse escolhido um peso igual a 60 (ao invés de 50) para os dados menos confiáveis, o algoritmo forneceria exatamente a mesma seleção de pseudomedidas (já que 60 ainda é menor que o peso atribuído às injeções

nulas).

Os valores relativos dos pesos para a seleção de medidas influenciam indiretamente os resultados da estimação de estados, pois determinam quais pseudomedidas serão processadas pelo estimador. Contudo, os valores absolutos dos pesos não participaram de nenhum cálculo durante o processo de estimação. Isto significa que ambas as escolhas de pesos descritas no exemplo acima produzirão as mesmas estimativas para os estados. Não há portanto nenhum risco de instabilidade numérica durante a estimação de estados devido à ponderação utilizada para a seleção das medidas.

Neste aspecto, há uma marcante diferença de comportamento entre os pesos utilizados para seleção de medidas e os fatores de ponderação relacionados às variâncias. Os valores numéricos destes últimos participam do cálculo de matrizes e vetores no processo de estimação de estados, e portanto afetam diretamente os estados estimados. Este fato tem sido utilizado na literatura como um artifício para reduzir os erros na fronteira quando da modelagem do SE (Geisler & Bose, 1983; Lu *et alii*, 1990; IEEE, 1993). Entretanto, como os fatores de ponderação assim determinados podem assumir valores muito díspares, deve se ter cuidado para evitar problemas de instabilidade numérica (ver discussão de Lu *et alii* (1990)).

É desejável que os critérios de definição dos pesos para a seleção de medidas classifiquem os dados externos disponíveis em vários níveis de prioridade, de acordo com a confiança atribuída às pseudomedidas. Uma vez escolhidos os patamares de confiança, associam-se pesos diferentes a cada nível, sendo que os maiores pesos devem corresponder aos dados em que se tem maior confiança. Como a estimação é realizada para o sistema global, devem ser atribuídos pesos também às medidas do SI. Contudo, não é necessário o estabelecimento de prioridades distintas para estas medidas, já que não é desejável que as mesmas sejam críticas. Deste modo, são atribuídos pesos iguais a todas as medidas do SI. Após o algoritmo proposto ter selecionado as pseudomedidas não-redundantes para o sistema global, são adicionadas as medidas restantes do SI.

A seguir, são discutidos alguns possíveis critérios de ponderação de medidas.

5.2 Ponderação por Idade da Medida

No SI são realizadas varreduras das unidades terminais remotas (UTRs) a intervalos de tempo regulares. A cada intervalo, as quantidades monitoradas são atualizadas no COS do SI. O COS também recebe dados e informações sobre pseudomedidas do SE, através da troca de informações com os COSs das companhias vizinhas. Estes dados geralmente chegam com uma defasagem de tempo entre si e em relação às telemidas do SI, o que resulta na existência de informações com diferentes níveis de atualização. A coordenação entre COSs para que as varreduras sejam simultâneas e para realizar o intercâmbio de informações de forma simultânea não é ainda considerada uma proposta de fácil implementação. Entretanto, mediante uma ponderação adequada, é possível garantir a seleção das in-

formações mais recentes do SE. Para isto, propõe-se que a cada pseudomedida e informação proveniente das diversas empresas que fazem parte do SE, seja associado um peso de acordo com o tempo de defasagem entre as varreduras efetuadas pelo SI e pela concessionária que faz parte do SE. Se a defasagem for zero, isto é, se ambas as varreduras forem coincidentes no tempo, o peso das pseudomedidas correspondentes será máximo.

5.3 Ponderação por Tipo de Barra

Um objetivo importante a se cumprir na modelagem explícita do SE utilizando um conjunto de pseudomedidas e informações críticas é o de realizar um balanço perfeito nas barras de fronteira (Deckmann *et alii*, 1980). Para isto ser possível, é importante que as injeções de potência na fronteira façam parte do conjunto de "medidas" críticas do SE. Portanto, é desejável atribuir a estas quantidades uma ponderação maior que a atribuída às demais pseudomedidas ou informações do SE.

A informação fornecida por uma barra de transferência do SE é também muito valiosa, já que o valor das injeções neste tipo de barra é conhecido com precisão (as injeções são nulas). É portanto igualmente desejável atribuir pesos mais elevados para tais pseudomedidas. Critério semelhante pode ser empregado na seleção de pesos para as pseudomedidas de tensão nas barras de geração do SE.

6 RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1 Descrição dos Testes

O desempenho do método proposto foi avaliado através de sua aplicação a dois sistemas-teste: o sistema de 14 barras do IEEE e um equivalente de 48 barras do sistema interligado do Sul do Brasil. Supõe-se que cada sistema é composto de um subsistema interno e um subsistema externo, conforme detalhado abaixo, nas subseções pertinentes. Os testes consistem das seguintes etapas:

1. É estabelecido um plano de medição para o sistema global (*SI + SE*);
2. As medidas são simuladas através da superposição de erros aleatórios às quantidades medidas;
3. Aplica-se o algoritmo proposto para selecionar um conjunto não-redundante de medidas para o sistema global, através da determinação de uma árvore geradora observável máxima;
4. As demais telemedidas disponíveis para o sistema interno são adicionadas ao conjunto de medidas selecionadas na etapa 3, mas de tal forma a preservar a criticidade das pseudo-medidas externas;
5. O plano de medição resultante é utilizado para executar a estimação de estados para o sistema global, através de um estimador ortogonal (a técnica de enfatizar o cumprimento dos limites de tensão e de potência

Tabela 1 - Ponderação das Pseudomedidas Externas

Tipo de Barra	Meds. Atualizadas			Meds. Defasadas		
	P	Q	V	P	Q	V
PQ	50	50	50	20	20	20
PV	80	50	110	50	20	50
PQ- V_{lim}^*	80	80	50	20	20	20
Injeção Nula	100	100	50	-	-	20
Fronteira	150	150	50	120	120	20

(*) barra PQ sujeita a limite de

reativa proposta em Monticelli & Wu (1985) é também empregada);

6. A partir dos resultados da estimação de estados, executa-se a Análise de Contingências (AnC), simulando-se a saída de uma linha ou transformador do SI e executando-se uma rotina de fluxo de potência;
7. Finalmente, os resultados da AnC são comparados com resultados similares obtidos mediante um estudo de fluxo de potência baseado nos dados originais para o sistema-teste, considerando a mesma contingência.

A escolha dos pesos para a execução da etapa 3 do algoritmo acima é feita como descrito a seguir. Os pesos para as medidas do SI são considerados arbitrariamente iguais a 100, e este valor é também tomado como referência para a definição dos demais pesos. Pseudomedidas externas supostas defasadas no tempo recebem ponderação inferior às pseudomedidas "em fase" com as medidas internas. A Tabela 1 apresenta o esquema de ponderação usado para os dados referentes ao SE.

6.2 Sistema-Teste de 14 Barras do IEEE

Este sistema-teste tem sido bastante utilizado em estudos ligados à análise da observabilidade de sistemas de potência (Krumpholz *et alii*, 1980), e seu diagrama unifilar está apresentado na Fig. (1). Constituem o SI as barras 1 a 5, sendo as restantes consideradas como parte do SE. As barras 4 e 5 são de fronteira e a barra 7 é uma barra de transferência. A Fig. (1) também mostra a máxima árvore geradora observável obtida mediante a aplicação do algoritmo proposto, com as respectivas ponderações das arestas. Para o SI, o plano de medição é formado pelas injeções ativas e reativas nas barras 1 a 3 e por medidas de fluxo em cada uma das linhas do SI. Para o SE, as medidas e respectivos pesos são dados a seguir (quando não especificados, os pesos são considerados conforme a Tabela 1): injeções ativas e reativas nas barras 11 e 12, que são barras PQ com limites de tensão enfatizados, cujos pesos são iguais a 80; injeções ativas e reativas nas barras PQ 9, 10 e 14, consideradas como pseudomedidas defasadas no tempo; injeções e magnitudes de tensão para as barras de geração 6 e 8; injeções na barra de transferência 7; fluxos ativos e reativos nas linhas 14, 17 e 18, cujos pesos são iguais a 40, exceto para a linha 14, cujas pseudomedidas são supostas defasadas no tempo e que recebem ponderação igual a 20.

A Tabela 2 apresenta uma amostra dos resultados obtidos com o sistema-teste de 14 barras. No caso em questão, foi

Tabela 2 - Desvios nos valores das injeções ativas e reativas nas barras do SI quando da retirada da linha (2-3)

Barra	Tipo	Desvio		Desvio	
		Pot. Ativa		Pot. Reativa	
		MW	%	MVAr	%
1	Folga	3.81	1.56	0.34	3.78
2	Ger.	1.18	6.45	0.35	1.17
3	Carga	0.00	0.00	0.00	0.00
4	Front.	1.48	3.10	0.10	2.90
5	Front.	0.12	1.58	0.12	0.44

simulada a saída da linha (2-3), sendo mostrados na tabela os erros de injeção de potência em MW e MVAr nas barras do sistema interno. Estes erros são calculados com respeito a um estudo de fluxo de potência que considera a mesma contingência. Observa-se que os desvios são pequenos e estão dentro da faixa considerada aceitável em estudos de AnC. Os desvios verificados nas magnitudes de tensão nas barras foram todos inferiores a 0.01 pu.

6.3 Equivalente Sul

Este sistema é formado por 48 barras e 65 linhas e foi decomposto em um SI de 12 barras, sendo 9 destas internas e as 3 restantes de fronteira, e um sistema externo que compreende as 36 barras restantes. Para melhor avaliar o método de seleção de pseudomedidas, um número relativamente alto de dados externos relativos a injeções e fluxos, além de sete medidas de magnitude de tensão, é suposto disponível para o COS do SI. Várias destas pseudomedidas são consideradas defasadas no tempo, e os limites de tensão para quatro barras PQ e de potência reativa para as barras PV são enfatizados.

A Tabela 3 apresenta os desvios de maior magnitude para as injeções de potência ativa e reativa nas barras do SI, após a simulação da saída da uma linha do sistema interno. Como no caso anterior, os desvios são calculados com respeito a um estudo de fluxo de potência executado para a mesma contingência e são de pequena magnitude. Os erros de magnitude de tensão para as barras internas mantiveram-se abaixo de 0.01 pu.

Tabela 3 - Desvios nos valores das injeções ativas e reativas nas barras do SI quando da retirada da linha 58(39-47)

Barra	Tipo	Desvio		Desvio	
		Pot. Ativa		Pot. Reativa	
		MW	%	MVAr	%
20	Front.	3.43	1.77	2.05	3.64
30	Front.	0.00	0.00	0.00	0.00
36	Carga	1.44	2.39	0.85	3.65
37	Transf.	3.05	—(*)	1.27	—(*)
38	Ger.	2.40	2.18	0.61	1.15
39	Ger.	1.54	0.70	0.41	1.06
46	Carga	0.54	2.05	0.08	0.94
47	Front.	2.46	1.87	0.03	0.08

(*) Valor indefinido (barra é de transferência)

6.4 Tempos de Execução

O desempenho computacional do método proposto pode ser avaliado através dos tempos de execução apresentados na Tabela 4. O esforço computacional é função do número de arestas criadas no grafo de medição em decorrência das pseudomedidas de injeção a serem processadas. Por este motivo, a segunda coluna da Tabela 4 exhibe este dado para os sistemas-teste. Além disso, foram também incluídos na Tabela os resultados obtidos com o sistema-teste de 30 barras do IEEE (Monticelli & Wu, 1985). Resultados da análise de contingências para o mesmo sistema não são relatados no artigo devido às limitações de espaço.

Tabela 4 - Tempo computacional em segundos gasto na seleção de pseudomedidas

Sistema	No. Arestas	tempo
14 Barras IEEE	91	0.05
30 Barras IEEE	196	0.21
48 Barras S. Sul	357	0.67

7 CONCLUSÕES

Para realização de estudos de Análise de Segurança necessita-se de um modelo do Sistema Externo em tempo-real, o qual forneça uma boa representação da reação do mesmo sobre o Sistema Interno. No presente trabalho, é apresentado um método para selecionar, em tempo-real, um conjunto de pseudomedidas e informações críticas a s na modelagem do Sistema Externo. O uso de pseudomedidas críticas tem c objetivo evitar a contaminação dos estados do Sistema Interno, quando é realizada a estimação de estados do sistema global em uma única etap

O método proposto fornece meios para se ponderar as pseudomedidas Sistema Externo de modo a se estabelecer prioridades para sua inclusão plano de medição do sistema global. Torna-se assim possível sel conjunto de pseudomedidas que se caracterizam por serem as mais confiá dentre as disponíveis no COS do Sistema Interno. O algoritmo proposto apresenta as seguintes características :

- sólida base matemática;
- grande flexibilidade para permitir a atribuição de pesos telemidas, pseudomedidas e informações do banco de dados do de acordo com critérios do usuário;
- eficiência computacional e bom desempenho, o que viabiliza seu em tempo-real.

O algoritmo foi testado com auxílio de dois sistemas-teste. pseudomedidas externas selecionadas, juntamente com as telemidas do Sistema são fornecidas a um estimador de estados, com o intuito de verificar a modelagem do Sistema Externo. Os resultados dos testes de Análise de Con traduzidos através dos desvios de potência em MW e MVAr nas barras do SI e fronteira referidos a um fluxo de potência padrã atestam o bom desempenho do método.

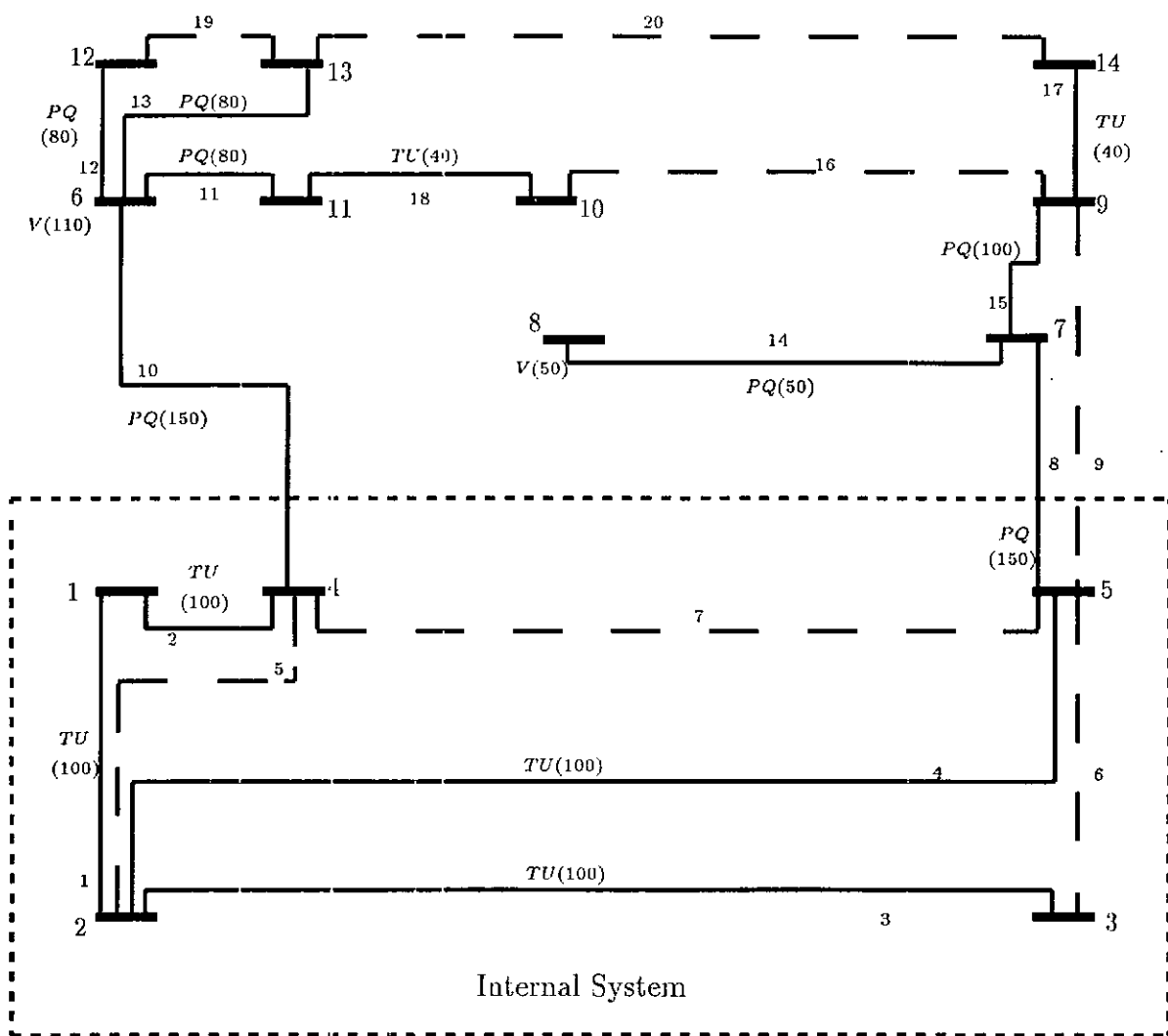


Figura 1 - Máxima árvore geradora observável e pseudomedidas selecionadas para o subproblema $P - \delta$ no Sistema de 14 barras. As arestas da máxima árvore geradora observável são indicadas por linhas sólidas. Medidas consideradas: magnitudes de tensão (V), injeções de potência ativa (P) e reativa (Q), fluxos de potência ativa (T) e reativa (U). Os pesos utilizados para as medidas são indicados entre parênteses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arze, Marcelo J. T., (1991) *Aplicações de Métodos Combinatórios a Sistemas Elétricos de Potência: Seleção de Pseudomedidas para Modelagem Explícita do Sistema Externo*. Dissertação de Mestrado, UFSC.
- Bose, A. and K. A. Clements, (Dec. 1987) "Real-Time Modeling of Power Networks". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No.12, pp. 1607-1622.
- Bose, A. (1984). "Modeling of external networks for on-line security analysis", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 103, No 8:pp. 2117-2125.
- Bose, A. (1986). "The effects of external modeling errors on on-line security analysis" *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 105, No 1:pp. 227-232.
- Dabbaghchi, I., and L. S. VanSlyck, (Aug. 1988), "Inter-Utility Data Exchange for State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No.3, pp. 1254-1262.
- Deckmann, S., A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott, O. Alsac, (1980). "Studies on power system load flow equivalencing", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 99, No 6:pp. 2301-2310.
- Deckmann, S., A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott, O. Alsac, (1980a). "Numerical testing of power system load flow equivalents", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 99, No 6:pp. 2292-2300.
- Frank, A. (1980). "On weighted matroid intersection algorithm", *Research Report CORR 80-18, Department of Combinatorics and Optimization, University of Waterloo, Canada.*

- Frank, A. (1981). "A weighted matroid intersection algorithm", *Journal of Algorithms*, No 2:pp. 328-336.
- Geisler, K. and A. Bose, (Aug. 1983) "State Estimation Based External Network Solution for On-line Security Analysis". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 102, pp. 2447-2454.
- Geisler, K. ; N. K. Tripathi, (1985). "State estimation based network solutions: field testing", *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 104, No 8:pp. 2126-2132.
- Holten, L., A. Gjelsvik, S. Aam, F. F. Wu, and W. E. Liu, (, Nov. 1988), "Comparison of Different Methods for State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No.4, pp. 1798-1806.
- IEEE Task Force, (Jan. 1993) "External Network Modeling - Recent Practical Experience". Paper No. 93 WM 164-4 PWRs, *IEEE/PES Winter Meeting*, Columbus.
- Kidner, R., and A. Bose, (1991), "Effects on State Estimation of Time-Skew Errors in Inter-Utility Data Exchange". *Electric Power System Research*, pp. 165-171.
- Krumpholz, G. R., K. A. Clements and P. W. Davis, (July/Aug. 1980), "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 99, No.4, pp. 1534-1542.
- Lawler, E. L., (1975), "Matroid intersection algorithm", *Mathematical Programming*, No 9:pp. 31-56.
- Lu, N. C., K. C. Liu and S. Vemuri, (May 1990) "An External Network Modeling Approach for On-Line Security Analysis". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No.2, pp. 565-573.
- Monticelli, A. and F. F. Wu., (Jan. 1985) "A Method That Combines Internal State Estimation and External Network Modeling". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 104, No.1, pp. 91-103.
- Piazza, T. ; Simões Costa. (1990). "Um método combinatório integrado para determinação de medidas e conjuntos críticos", *Anais do 8 Congresso Brasileiro de Automatica, UFFa, Belem, PA.*, Vol. 2:pp. 636-642.
- Quintana, V. H., A. Simões Costa and A. Mandel, (March 1982), "Power System Topological Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach". *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 101, No.3, pp. 617-625.
- Sanderson, P., R. Curtis, D. Athow, C. N. Lu, K. C. Liu, and C. Letter, (Nov. 1991), "Real Time Complete Model Estimation for Contingency Study: Field Experience" *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No.4, pp. 1480-1484.
- Simões Costa, A., T. S. Piazza and A. Mandel, (Aug. 1990), "Qualitative Methods to Solve Qualitative Problems in Power System State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No.3.
- Van Cutsem, Th., and P. J. Gailly, (Sept. 1983), "A Simple Algorithm for Power System Observability Analysis and Related Functions". *IFAC Symposium on Control Applications to Power System Security*, Florence.
- Welsh, D., (1976) *Matroid Theory*. Academic Press, London.
- Wu, F. F. ; Monticelli, A. (1983). "A critical review on external network modeling for on-line security analysis", *Int. J. Electric Power and Energy Systems*, No 5:pp. 222-235.