XVI SNPTEE
Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

GOP/018

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO IX
GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)

MÉTODO PARA O TRATAMENTO DE QUESTÕES QUALITATIVAS REFERENTES AO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

J.B.A.LONDON Jr.
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

N.G. BRETAS*
Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Resumo — Neste artigo propõe-se um método que permite, de uma forma simples e rápida, a análise e restauração da observabilidade, bem como a identificação de medidas críticas e conjuntos críticos de medidas, quando uma ou mais medidas são perdidas. O método proposto baseia-se numa metodologia desenvolvida para a identificação do nível de redundância das medidas [5]. Para comprovar a sua eficiência, vários testes foram realizados, utilizando o sistema de 14 barras do IEEE, o sistema de 121 barras da ELETROSUL e um sistema de 384 barras da CHESF.

Palavras-chave: Estimação de estado, observabilidade, medidas críticas, conjuntos críticos de medidas.

1.0 - INTRODUÇÃO

Para obter-se uma operação em tempo real, adequada e segura, de um sistema de potência, é necessário uma estimação de estado confiável. Para isto, o nível de redundância das medidas disponíveis deve ser tal, que garanta a observabilidade do sistema, ou seja, a determinação de todos os seus estados e a não presença das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas. Isto porque não é possível detectar erro grosseiro em medida crítica, nem mesmo identificá-lo em medidas pertencentes a conjuntos críticos de medidas.

Na tentativa de superar essas dificuldades, foram desenvolvidos métodos para a análise e restauração da observabilidade [1,4,6,7], assim também métodos para a identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas [2,3].

Buscando uma análise mais refinada quanto à questão da redundância das medidas, fornecidas ao estimador, em [5] encontra-se uma metodologia, que permite a identificação do nível de redundância de cada uma daquelas medidas.

Visando a uma estimação de estado confiável, os sistemas de potência devem ser projetados para serem observáveis e possuírem um nível de redundância tal, que garanta a não presença de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas. Entretanto, durante a operação de um sistema de potência, podem ocorrer problemas no sistema de aquisição de dados (sistema de telemedição). Tais problemas podem acarretar a perda de uma ou mais medidas, podendo dificultar a operação do sistema.

Em situações como essa, para tornar ainda possível uma operação confiável do sistema, é necessário que o operador obtenha, o mais rápido possível, as seguintes informações: (i)Se o sistema em análise continua observável; (ii)Caso continue observável, quais as características qualitativas do conjunto de medidas disponível naquele momento (presença de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas); (iii)Caso o sistema tenha perdido a observabilidade, quais as pseudomedidas necessárias à restauração da observabilidade.

O que ora se propõe é o desenvolvimento de um método para a solução do problema mencionado, através do qual possa o operador de um sistema de potência cientificar-se, de forma rápida e simples, daquelas informações. Consequentemente, o método propiciará uma operação mais confiável do sistema.

A sustentação teórica do método proposto está na metodologia desenvolvida em [5], para a identificação do nível de redundância das medidas.

Este artigo está organizado como segue: na seção 2 são apresentadas as idéias principais da metodologia desenvolvida para a identificação do nível de

* Escola de Engenharia de São Carlos - USP
Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Trabalhador São Carlense 400, São Carlos - SP - Brasil
CEP: 13560-250 Tel.: (016) 273 9366 - R.219

redundância das medidas. Na seção 3 encontra-se o método proposto, juntamente com exemplos da sua aplicação. Na seção 4 estão os resultados dos testes realizados, sendo que as conclusões são apresentadas na seção 5.

2.0 - METODOLOGIA PARA A IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE REDUNDÂNCIA DAS MEDIDAS

A metodologia desenvolvida em [5] possibilita a identificação do nível de redundância das medidas, fornecidas ao estimador de estado. Para isto, tal metodologia permite identificar, primeiramente, os chamados conjuntos *p*-críticos. Estes são conjuntos de '*p*' medidas ($p \geq 1$), associadas a um sistema de potência observável, que, caso perdidas simultaneamente, tornam tal sistema não observável. Assim, para $p = 1$, a metodologia permite identificar as medidas críticas; para $p = 2$ os pares críticos; para $p = 3$ os trios críticos; e assim por diante.

Importa destacar que **conjunto *p*-crítico** não é, por definição, a mesma coisa que **conjunto crítico** de medidas, pois, de acordo com a sua definição, **conjunto crítico** de medidas é o conjunto de medidas constituído por medidas não críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas [3]. Assim, observa-se que um conjunto ***p*-crítico** será igual a um **conjunto crítico**, somente se ambos possuírem duas medidas, porquanto, a retirada de uma das medidas de um **par crítico** torna a outra crítica. Verifica-se também que as medidas de um **par crítico**, assim como as medidas de um **conjunto crítico**, possuem resíduos normalizados iguais. Entretanto, os conjuntos ***p*-críticos**, com $p \neq 2$, não constituem **conjuntos críticos** de medidas. Por exemplo, o conjunto ***p*-crítico**, com $p=1$, é a própria medida crítica; já em um conjunto ***p*-crítico**, com $p=3$, verifica-se que a retirada de uma das suas medidas não torna as demais medidas críticas. Vale ressaltar também que as medidas que pertencem a esses conjuntos ***p*-críticos**, com $p \neq 2$, em geral não apresentam os mesmos resíduos normalizados.

Para identificar os conjuntos *p*-críticos, a metodologia baseia-se nas relações de dependência linear das linhas da matriz H_Δ, mostrada na Figura 1.

$$H_\Delta = \left[\begin{array}{c|c} I_{(n-1)} & \begin{array}{c} 0 \\ . \\ . \\ 0 \end{array} \\ \hline R & \end{array}\right]$$

Onde:
I - submatriz identidade, de dimensão (n-1)x(n-1);
R - submatriz de dimensão [m-(n-1)]x(n-1);
n - número de barras do sistema;
m - número de medidas.

Figura 1. Matriz H_Δ obtida para o Modelo real

Observação1: A última coluna de H_Δ corresponde à barra escolhida como referência angular.

Essa matriz é obtida através de um processo de fatoração triangular da matriz Jacobiana (H). Importa salientar que o processo de fatoração a ser aplicado à matriz H, para a obtenção de H_Δ, possui algumas particularidades. Isto em razão de H ser uma matriz retangular e ante a exigência de a fatoração ser realizada através da combinação das suas colunas, correspondentes aos estados do sistema. Logo, a matriz H_Δ relaciona as medidas com estados equivalentes, que são combinações lineares dos estados reais.

Os elementos não nulos, que aparecem em uma coluna da matriz H_Δ, indicam as medidas que dão a informação do estado equivalente, correspondente àquela coluna. Logo, as *p* medidas, correspondentes às linhas dos *p* elementos não nulos, que aparecem em uma coluna de H_Δ, formam um conjunto *p*-crítico de medidas.

Assim, para identificar os conjuntos *p*-críticos, basta realizar uma busca dos elementos não nulos que aparecem nas colunas da matriz H_Δ.

Vale ressaltar que tal análise possibilita a identificação dos conjuntos *p*-críticos, que possuem apenas uma medida básica. Medidas básicas são aquelas que correspondem às linhas da submatriz I. As medidas que correspondem às linhas da submatriz R são chamadas de medidas suplementares. Para verificar como a metodologia possibilita a identificação dos conjuntos *p*-críticos, que possuem mais de uma medida básica, consulte a referência [5].

3.0 - MÉTODO PROPOSTO

Durante a operação de um sistema de potência, problemas no sistema de telemedição podem acarretar a perda de uma ou mais medidas. Em situações como esta, o método proposto será de grande valia para o operador do sistema, dando-lhe as seguintes informações: (i) Se o sistema continua observável; (ii) Caso continue, quais as características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível; (iii) Caso tenha perdido a observabilidade, indicará, imediatamente, as pseudomedidas necessárias à restauração da observabilidade, e, em seguida, as características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível.

Por limitação de espaço, ao invés de apresentarmos o método proposto com base nas matrizes H e H_Δ, serão utilizadas as matrizes H^t e H^t_Δ; lembrando-nos de que as colunas dessas matrizes correspondem às medidas e as suas linhas aos estados reais e equivalentes, respectivamente.

Inicialmente se elucidará como o método proposto permite a identificação das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas.

Observação2: Neste trabalho será considerado apenas o modelo real (modelo Pθ). Entretanto, considerando que as medidas de potência ativa e reativa são realizadas aos pares e a existência de apenas uma *medida de amplitude de tensão, os resultados obtidos para o modelo real são válidos para o modelo reativo (modelo QV).*

3.1 Identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas

De acordo com a metodologia desenvolvida em [5], para identificar as medidas críticas, basta realizar uma busca das ***linhas*** de H^t_Δ, que possuem apenas um elemento não nulo, uma vez que as medidas correspondentes às ***colunas*** desses elementos são críticas.

Para realizar a identificação dos conjuntos críticos de medidas, as informações mais importantes que se obtêm, através das colunas de H^t_Δ, referem-se à identificação das medidas críticas e dos pares críticos de medidas, constituídos por uma medida básica e uma medida suplementar. Isto porque, para realizar a busca dos conjuntos críticos de medidas, primeiramente se faz necessário saber quais são as medidas críticas, pois, de acordo com a definição de conjunto crítico, apresentada na seção II, essas medidas não devem ser consideradas naquela busca. A importância de se conhecerem os pares críticos de medidas é que, como já mencionado na seção II, as duas medidas que constituem um par crítico pertencem ao mesmo conjunto crítico de medidas. Face a isto, os pares críticos servem para guiar a busca dos conjuntos críticos de medidas, diminuindo assim a busca necessária.

Considerando o que foi dito acima, a identificação dos conjuntos críticos de medidas, através da matriz H^t_Δ, realiza-se em três etapas:

1°Etapa: Mediante as medidas disponíveis, construa a matriz H^t, obtendo a matriz H^t_Δ. Em seguida identifique, através das linhas de H^t_Δ, as medidas críticas e os pares críticos de medidas, formados por apenas uma medida básica.

2°Etapa: Se for identificado pelo menos um par crítico de medidas, na primeira etapa, elimina-se da matriz H^t_Δ uma medida suplementar, que apareça em pelo menos um par crítico. Analisando as colunas da nova matriz H^t_Δ, as medidas básicas, que ***agora*** são identificadas como críticas, constituem, juntamente com a medida suplementar eliminada, um conjunto crítico de medidas.

Esta etapa é finalizada quando todas as medidas suplementares, pertencentes a pelo menos um par crítico de medidas, identificado na primeira etapa, tiverem sido consideradas. Entretanto, caso não se tenha identificado, na primeira etapa, nenhum par crítico de medidas, não se exigirá a realização desta segunda etapa. Isto porque a eliminação de qualquer uma das medidas suplementares não iria gerar nenhuma medida crítica nova, pois, para cada medida básica, haveria no mínimo duas medidas suplementares, dando a mesma informação.

3°Etapa: Se existir alguma medida básica não crítica, não pertencente aos conjuntos críticos já identificados, elimina-se da matriz H^t_Δ tal medida. Em seguida, obtém-se a nova matriz H^t_Δ, e, analisando as linhas desta matriz, as medidas básicas, que ***agora*** são identificadas como críticas, constituirão, juntamente com a medida básica eliminada, um conjunto crítico de medidas.

Esta etapa é finalizada quando todas as medidas básicas não críticas, não pertencentes a conjuntos críticos já identificados, tiverem sido analisadas.

3.1.1 Exemplo

Para exemplificar como o método proposto permite a identificação das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas, vamos considerar o sistema e o conjunto de medidas apresentados na Figura 2.

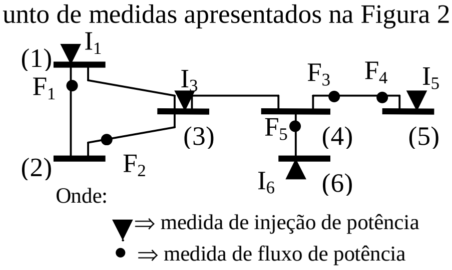

Figura 2. Sistema de 6 barras

1°Etapa: Considerando as medidas indicadas na Figura 2, obtém-se a seguinte matriz H^t:

$$H^t = \begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\\6 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccccc} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & I_1 & I_3 & I_5 & I_6 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \end{array}$$

A matriz H^t_Δ será:

$$H^t_\Delta = \begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\\6 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc|cccc} F_1 & F_2 & I_3 & F_4 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \end{array}$$

Analisando as linhas desta matriz, identifica-se uma medida crítica, a medida I_3, identificando-se, ainda, 3 pares críticos de medidas: (i)[F_1,I_1]; (ii)[F_2,I_1] e (iii)[F_5,I_6].

2° Etapa: A medida I_1 aparece em dois pares críticos. Logo, retirando a coluna correspondente a essa medida de H^t_Δ, obtém-se:

$$H^t_{\Delta I1} = \begin{array}{c} \\ 1\\2\\3\\4\\5\\6 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc|ccc} F_1 & F_2 & I_3 & F_4 & F_5 & F_3 & I_5 & I_6 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \end{array}$$

Através das linhas de $H^t_{\Delta I1}$, verifica-se que as medidas F_1 e F_2 tornaram-se críticas. Consequentemente, essas medidas constituem, juntamente com a medida I_1, um conjunto crítico de medidas: [F_1,F_2,I_1].

Realizando a mesma operação, considerando a medida suplementar I_6, identifica-se mais um conjunto crítico de medidas: [F_5, I_6] .

3°Etapa: F_4 é a única medida básica não crítica, que não apareceu em nenhum conjunto crítico, identificado na etapa anterior. Assim, eliminando essa medida da matriz H^t_Δ, obtém-se:

$$H^t_{\Delta F4} = \begin{array}{c|cccc|cccc}
 & F_1 & F_2 & I_3 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \\
\hline
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\
2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\
5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
\hline
6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}$$

Trocando as posições das colunas dessa matriz, como se mostra a seguir, podemos obter a nova matriz H^t_Δ, que é a seguinte:

$$H^t_{\Delta F4} = \begin{array}{c|ccccc|ccc}
 & F_1 & F_2 & I_3 & F_3 & F_5 & I_1 & I_5 & I_6 \\
\hline
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\
2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\
\hline
6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}$$

Através das linhas dessa matriz, verifica-se que nenhuma medida básica tornou-se crítica. Logo, F_4 não faz parte de nenhum conjunto crítico e a análise está encerrada.

3.2 Restauração da observabilidade e identificação das características qualitativas do conjunto de medidas

Para possibilitar a restauração da observabilidade, bem como a identificação das características qualitativas do conjunto de medidas, quando há perda de uma ou mais medidas, considera-se que a matriz H^t_Δ já esteja construída, antes da ocorrência da falha no sistema de telemedição. Assim, inicialmente se realiza a construção da matriz H^t, considerando estejam disponíveis as medidas de todos os medidores instalados no sistema e todas as medidas virtuais disponíveis no mesmo (medida de injeção zero em nó passivo). Consequentemente, como os sistemas de potência são planejados para serem observáveis, o posto de H^t é completo e sempre será possível a obtenção da matriz H^t_Δ.

Através dessa matriz e de posse das pseudomedidas disponíveis, quando se dá a perda de uma ou mais medidas, o método proposto permite o alcance dos objetivos em mira, da seguinte forma: (i)Elimina-se da matriz H^t_Δ as colunas correspondentes às medidas que foram perdidas; (ii) Se existir pelo menos uma linha na matriz H^t_Δ, não considerando a última linha, composta apenas por zeros, é porque o sistema perdeu a observabilidade, já que não existe nenhuma medida dando a informação do estado equivalente associado àquela linha.

Utilizando as diretrizes do método para análise de observabilidade, desenvolvido em [7], o método proposto pode ser adaptado para realizar a identificação das ilhas observáveis. Entretanto, como estamos interessados na restauração da observabilidade, na situação mencionada, o método proposto indicará ao operador a(s) pseudomedida(s) necessária(s) para a restauração da observabilidade. Em seguida, indicará as novas características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível; (iii) Se apenas a última linha de H^t_Δ for composta somente por zeros, o método indicará ao operador que o sistema continua observável, e, em seguida, dará as novas características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível.

3.2.1 Algoritmo

Variáveis que serão utilizadas no algoritmo:

MDP - variável onde serão armazenadas as medidas disponíveis, antes da ocorrência da falha. Inicialmente serão armazenadas as medidas de todos os medidores instalados e todas as medidas virtuais;

P - variável onde será armazenado o conjunto de medidas que foi perdido;

PA - indica o próximo passo a ser executado;

LV - indica a linha do pivô nulo;

NB - número de medidas básicas que foram perdidas;

np - indica a pseudomedida a ser analisada.

Passo 1: Construir a matriz H^t, através das medidas armazenadas na variável MDP, obtendo depois a matriz H^t_Δ, armazenando os fatores triangulares, e, através dos elementos não nulos das linhas de H^t_Δ, identificar os conjuntos *p*-críticos de medidas, formados por apenas uma medida básica.

O processamento dos próximos passos só ocorrerá na presença de alguma falha no sistema de telemedição.

Passo2: Armazene o conjunto de medidas que foi perdido na variável **P**.

Passo3: Se o conjunto de medidas armazenado em **P** for constituído apenas por medidas suplementares, informe o operador de que o sistema continua observável e vá ao Passo 9. Caso contrário, vá para o próximo passo.

Passo4: Se o conjunto de medidas armazenado em **P** possuir apenas uma medida básica, vá para o próximo passo, ou, caso contrário, para o passo 10.

Passo5: Se o conjunto de medidas armazenado em **P** for um conjunto p-crítico de medidas, identificado no passo 1, informe o operador de que se há de exigir, para continuar operando o sistema, o uso de pseudomedida; elimine da matriz H^t_Δ as colunas correspondentes às medidas armazenadas em **P**; faça **PA** = 9 e vá para o próximo passo. Caso contrário, indique ao operador que o sistema continua observável e vá para o passo 9.

Passo6 : Verifique qual a linha da matriz H^t_Δ, não considerando a última linha, é composta apenas por elementos nulos. Chamemos essa linha de linha "**LV**". Faça ***np*** = 0 e vá para o próximo passo.

Passo7: Faça ***np*** = ***np*** + 1; selecione a ***np*** pseudomedida disponível no centro de operação; crie uma nova coluna na matriz H^t_Δ para armazenar essa pseudomedida e vá para o próximo passo.

Passo8: Aplique à coluna, onde foi armazenada a pseudomedida em análise, os fatores triangulares obtidos até o momento, considerando a ordem adequada[1]. Caso o elemento dessa coluna, pertencente à linha **LV**, não seja nulo, indique ao operador que a pseudomedida de ordem ***np*** deve ser adicionada ao conjunto disponível de medidas, para restaurar a observabilidade do sistema em análise e vá para o

---

[1] Primeiramente são considerados os fatores triangulares responsáveis pela obtenção, no passo 1, da matriz H^t_Δ. Depois, os fatores que possam ter sido necessários para tornar a matriz H^t_Δ novamente triangular. Esta fatoração parcial é exigida sempre que se fizer necessária uma pseudomedida, para a restauração da observabilidade do sistema (operação esta que se realizará no passo 13), ou quando uma medida suplementar substituir uma medida básica eliminada (operação que será realizada no passo 12).

passo armazenado na variável **PA**. Caso contrário, elimine essa coluna de H^t_Δ e volte ao passo 7.

__**Passo9:**__ Elimine da matriz H^t_Δ as colunas correspondentes às medidas armazenadas em **P**. Em seguida, identifique as novas características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível e **Fim de processamento**.

__**Passo10:**__ Caso existam medidas suplementares armazenadas em **P**, elimine da matriz H^t_Δ as colunas correspondentes a essas medidas; guarde o número de medidas básicas armazenadas em **P** na variável "**NB**" e vá para o próximo passo.

__**Passo11:**__ Se **NB** $\neq$ 0, elimine da matriz H^t_Δ uma coluna correspondente a uma das medidas básicas armazenadas em **P**, mas, antes, verifique em que linha aparece o elemento não nulo dessa coluna. Faça **NB** = **NB** -1 e vá para o próximo passo. Caso contrário, **Fim de processamento**.

__**Passo12:**__ Em existindo algum elemento não nulo na linha de H^t_Δ, correspondente ao elemento não nulo da coluna eliminada no passo 11, obtenha novamente a matriz H^t_Δ; armazene em seguida os novos fatores triangulares e volte ao passo 11. Caso contrário, informe o operador de que, para continuar operando o sistema, exigir-se-á o uso de pseudomedida; faça **PA** = 13 e vá para o passo 6.

__**Passo13:**__ Se NB $\neq$ 0, obtenha a nova matriz H^t_Δ; armazene os novos fatores e volte ao passo 11. Caso contrário, identifique as novas características qualitativas do conjunto de medidas ainda disponível e **Fim de processamento**.

Observação 3: O algoritmo permite a análise de cada situação de falha, sem realizar nenhuma fatoração completa da matriz H^t, pois, as fatorações necessárias, nos passos 9, 12 e 13, são parciais, sendo que a fatoração necessária, no passo 1, realiza-se antes da perda de medidas.

Observação 4: O algoritmo foi desenvolvido considerando estar sempre disponível, no centro de operação, a pseudomedida necessária à restaurarão da observabilidade do sistema.

3.2.2 Exemplo

O algoritmo proposto será aplicado ao sistema e ao conjunto de medidas analisado na seção anterior. Consideramos ainda que, além das medidas indicadas na Figura 2, estejam também disponíveis, no centro de operação, as pseudomedidas de fluxo de potência $P_{(6-4)}$ e $P_{(4-3)}$. O algoritmo permitirá a análise, uma por uma, das seguintes situações de emergência: (i) Perda das medidas F_3 e I_5; (ii) Perda das medidas F_1 e F_2.

Passo 1: Como a matriz H^t já foi construída e fatorada, no exemplo apresentado na subseção 3.1.1, vamos apresentar diretamente a matriz H^t_Δ:

H^t_Δ =

	F_1	F_2	I_3	F_4	F_5	I_1	F_3	I_5	I_6
1	1	0	0	0	0	2	0	0	0
2	0	1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	-1	1	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A matriz dos fatores é:

Fatores =

	F_1	F_2	I_3	F_4	F_5
1	***1***	0	**1**	0	0
2	**1**	***1***	**2**	0	0
3	0	**1**	***1***	0	0
4	0	0	**1**	***-1***	**1**
5	0	0	0	**1**	***1***
6	0	0	0	0	**1**

Analisando as linhas da matriz H^t_Δ, obtém-se:

-1°Linha: [F_1;I_1] - par crítico;
-2°Linha: [F_2;I_1] - par crítico;
-3°Linha: [I_3] - medida crítica;
-4°Linha: [F_4; F_3; I_5] - trio crítico;
-5°Linha: [F_5;I_6] - par crítico.

__*Situação 1:*__ **Foram perdidas as medidas F_3 e I_5.**
Passo 2: **P** = {F_3; I_5}
Passo 3: Como o conjunto de medidas armazenado em **P** é formado apenas por medidas suplementares, o algoritmo indicará ao operador que o sistema continua observável. Vá para o passo 9.
Passo 9: Eliminando da matriz H^t_Δ as colunas correspondentes às medidas armazenadas em **P**, e, aplicando o algoritmo apresentado na subseção 3.1.1, identificam-se duas medidas críticas: I_3 e F_4; e dois conjuntos críticos: [F_1; F_2; I_1] e [F_5; I_6]. Fim da análise.

__*Situação 2:*__ **Foram perdidas as medidas F_1 e F_2.**
Lembrando que, no Passo 1, consideram-se todas as medidas disponíveis no sistema, isto é, aquelas indicadas na Figura 2, o Passo 1, para esta situação, será o mesmo que o considerado para a situação 1.
Passo 2: **P**={F_1; F_2}
Passo 3: O conjunto de medidas armazenado em **P** não possui nenhuma medida suplementar.
Passo 4: O conjunto de medidas armazenado em **P** possui mais de uma medida básica.
Passo 10: Em **P** não existe nenhuma medida suplementar. **NB** = 2 (existem duas medidas básicas em **P**).
Passo 11: **NB** = 2. A coluna correspondente à medida F_1 tem elemento não nulo na primeira linha; eliminando essa coluna de H^t_Δ obtém-se:

$H^t_{\Delta F1}$ =

	F_2	I_3	F_4	F_5	I_1	F_3	I_5	I_6
1	0	0	0	0	2	0	0	0
2	1	0	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	-1	1	0
5	0	0	0	1	0	0	0	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0

NB = 2-1=1.
Passo 12: Como $H^t_{\Delta F1}(1,5) \neq 0$, trocando-se as posições das colunas dessa matriz, como mostrado a seguir, pode obter-se novamente a matriz H^t_Δ, que será a seguinte:

H^t_Δ =

	I_1	F_2	I_3	F_4	F_5	F_3	I_5	I_6
1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	-1	1	0
5	0	0	0	0	1	0	0	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0

Considerando os fatores necessários para essa fatoração, a matriz dos fatores será:

Fatores =

	F_1	F_2	I_3	F_4	F_5	I_1
1	***1***	0	***1***	0	0	***0,5***
2	***1***	***1***	***2***	0	0	***-0,5***
3	0	***1***	***1***	0	0	0
4	0	0	***1***	***-1***	***1***	0
5	0	0	0	***1***	***1***	0
6	0	0	0	0	***1***	0

- Na última coluna foram armazenados os fatores responsáveis pela triangulação realizada nesta etapa.

Voltar ao Passo 11.
Passo 11: NB = 1. A coluna correspondente à medida F_2 tem elemento não nulo na segunda linha; eliminando essa coluna de H^t_Δ obtém-se:

$$H^t_{\Delta F2}=\begin{array}{r} \\ 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc|ccc} I_1 & I_3 & F_4 & F_5 & F_3 & I_5 & I_6\end{array}\\ \left[\begin{array}{cccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1\\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{array}\right]\end{array}$$

NB = 1-1=0.

Passo 12: Como a segunda linha dessa matriz é formada apenas por zeros, o algoritmo indicará ao operador que, para continuar operando o sistema, exigir-se-á o uso de pseudomedida; **PA** = 13. Vá para o passo 6.

Passo 6: **LV**=2; ***np*** = 0.

Passo 7: ***np*** = ***np*** + 1 = 1. O algoritmo vai selecionar a primeira pseudomedida disponível no centro de operação. É a pseudo-medida $P_{(6\text{-}4)}$. Será então criada a coluna 8, na matriz $H^t_{\Delta F2}$, onde será armazenada $P_{(6\text{-}4)}$. A matriz torna-se:

$$H^t_{\Delta F2}=\begin{array}{r} \\ 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc|cccc} I_1 & I_3 & F_4 & F_5 & F_3 & I_5 & I_6 & P_{(6\text{-}4)}\end{array}\\ \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0\\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1\end{array}\right]\end{array}$$

Passo 8: Aplicando os fatores triangulares, obtidos até o momento, à coluna 8 dessa matriz, verifica-se que $H^t_{\Delta F2}(2,8) = 0$. Logo, essa pseudomedida não serve para restaurar a observabilidade do sistema. Elimine a coluna 8 de $H^t_{\Delta F2}$ e volte ao Passo 7.

Passo 7: ***np*** = ***np*** +1 = 2. O algoritmo vai selecionar a segunda pseudo-medida disponível, no centro de operação. É a pseudo-medida $P_{(4\text{-}3)}$. Será então criada, novamente, a coluna 8, na matriz $H^t_{\Delta F2}$, onde se armazenará $P_{(4\text{-}3)}$.

Passo 8: Aplicando os fatores triangulares à nova coluna 8, obtém-se:

$$H^t_{\Delta F2}=\begin{array}{r} \\ 1\\ 2\\ 3\\ 4\\ 5\\ 6\end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc|cccc} I_1 & I_3 & F_4 & F_5 & F_3 & I_5 & I_6 & P_{(4\text{-}3)}\end{array}\\ \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0{,}5\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1{,}5\\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1\\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0\\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{array}\right]\end{array}$$

Como $H^t_{\Delta F2}(2,8) \neq 0$, o algoritmo indica ao operador que a pseudo-medida $P_{(4\text{-}6)}$ deve ser adicionada ao conjunto disponível de medidas, para restaurar a observabilidade do sistema. Vá para o Passo 13.

Passo 13: Como NB = 0, através do algoritmo apresentado na seção 3.1.1 identificam-se 3 medidas críticas: I_1, $P_{(4\text{-}3)}$ e I_3; e um conjunto crítico de medidas: [F_5; I_6]. Fim da análise.

4.0 - TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Visando a comprovar a eficiência do método proposto, para a identificação de medidas críticas e conjuntos críticos de medidas, foram realizados diversos testes, cujos resultados foram satisfatórios e determinados em curtos intervalos de tempo (os resultados de alguns dos testes realizados são apresentados na TABELA 1).

5.0 - CONCLUSÕES

O método permite, de forma rápida e simples, a análise e restauração da observabilidade, bem como a identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, quando uma ou mais medidas são perdidas.

A sua grande vantagem é permitir a realização das tarefas indicadas anteriormente, sem exigir nenhuma fatoração completa de matriz. Consequentemente, requer bem menor quantidade de cálculos numéricos, em relação aos métodos numéricos existentes.

Finalmente, acreditamos tenha sido alcançado o objetivo a que visávamos, isto é, tornar mais confiável o processo de estimação de estado.

Os testes realizados comprovaram a eficiência do método proposto.

TABELA 1. Resultados obtidos

Sistema	**Medidas disponíveis**	**Medidas críticas**	**Conjuntos críticos**	**Tempo de execução (Seg.)**
IEEE - 14 barras	42	1	1	0,00
121-barras Eletrosul	363	2	2	0,37
384-barras Chesf	528	115	76	0,89

* Para realizar os testes foi utilizado um processador pentium 166 MHz.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]BRETAS, N.G. Network Observability: Theory and algorithms based on triangular factorization and path graph concepts. IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, VOL. 143, N°1, p. 123-128, janeiro, 1996.

[2]CLEMENTS, K. A. ; KRUMPHOLZ, G. R. ; DAVIS, P. W. Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL.-PAS 100, N°4, p.1779- 1787, abril, 1981.

[3]KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. Identification and updating of minimaly dependent sets of measurements in state estimation. IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 6, N°3, p.999-1005, agosto, 1991.

[4]KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. Power system observability: a practical algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-99, N°4, p. 1534-1542, julho - agosto, 1980.

[5]LONDON J., J.B.A. Identificação do nível de redundância das medidas de um sistema de potência, para efeito da estimação de seus estados. São Paulo, 147p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, outubro, 2000.

[6]MONTICELLI, A.; WU, F.F. Network observability: Theory. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, N°5, p. 1042-1048, maio, 1985.

[7]MONTICELLI, A.; WU, F.F. Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation”. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.1, N°1, p. 201-208, fevereiro, 1986.