

Estimador de Estado Generalizado com Técnica Robusta de Processamento de Erros de Topologia

A. S. Costa¹; E. M. Loureço⁴; J. C. W. A. Costa²; U. H. Bezerra²; C. R. L. Francês²; M. E. L. Tostes²; E. M. Amazonas²; M. M Coutinho², E. Oliveira² e W. Charone Junior³

¹Universidade Federal de Santa Catarina, ⁴Universidade Federal do Paraná, ²Universidade Federal do Pará, ³Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A

Resumo

Apresenta-se neste artigo o desenvolvimento de um estimador de estado generalizado, com técnica robusta para o processamento dos erros de topologia. O método proposto utiliza a representação detalhada de regiões da rede previamente identificadas como suspeitas, as quais passam a ser modeladas no nível de seção de barra, sendo os fluxos ativos e reativos através dos disjuntores incluídos como variáveis de estado. São incluídas restrições operacionais e estruturais do sistema, e a estimação de estado é formulada como um problema de otimização, com o objetivo de minimizar a função objetivo composta pelos resíduos da estimação e por informações a priori sobre o vetor de estado. Este problema é resolvido utilizando-se o algoritmo do tableau esparso de Hachtel. Resultados obtidos da aplicação deste algoritmo em subestações do sistema ELETRONORTE de 230 kV- 500 kV, são apresentados, os quais demonstram que o algoritmo proposto mostrou-se eficiente em todos os casos simulados.

1. Introdução

A estimação de estados convencional, que se baseia na modelagem barra-ramo da rede elétrica, tem se mostrado adequada para o processamento de erros grosseiros em medidas analógicas, uma vez que estima os resíduos para esse tipo de informação. No entanto, a modelagem barra-ramo não fornece subsídios para a representação explícita de chaves e disjuntores, dificultando o processamento de erros envolvendo essas informações.

No início da última década, a solução do problema de representação de ramos de

impedância nula [1] possibilitou a representação do sistema no nível físico da rede, onde chaves e disjuntores são explicitamente representados, dando origem à chamada *Estimação de Estados Generalizada* [2]. De acordo com este conceito, a estimação de estados é conduzida em dois estágios. O primeiro estágio corresponde à estimação de estados convencional que utiliza a modelagem barra-ramo para a rede elétrica. Se um erro for detectado, a região onde o erro ocorreu é definida como *zona de anomalia* e o segundo estágio é acionado. No segundo estágio, a região de anomalia é representada no nível físico da rede, onde as subestações são representadas no nível de seção de barras, ou seja, chaves e disjuntores são explicitamente modelados.

Neste artigo a estimação de estados generalizada é tratada como um problema de otimização, onde as informações referentes aos status de chaves e disjuntores são incluídas como restrições de igualdade [3]. Isto permite a associação de multiplicadores de Lagrange a cada dispositivo modelado e, conseqüentemente, a possibilidade de investigação de erros nesses dados. O processamento de erros de topologia utilizado é baseado na interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange proposta em [4]. Ao contrário do procedimento de identificação apresentado em [4] e [5], o processamento de erros utilizado neste trabalho não emprega testes de hipóteses, estando unicamente centrado em testes de colinearidade. Isto torna o processo mais simples e eficiente para sistemas compostos por subestações de grande porte, como é o caso do sistema da ELETRONORTE.

2. Modelagem de ramos de impedância nula

O método proposto utiliza a representação detalhada de regiões da rede previamente identificadas como suspeitas. Estas regiões são modeladas no nível de seção de barra. Para isto, a representação de disjuntores proposta em [1] é utilizada, segundo a qual os fluxos ativos e reativos através dos disjuntores são incluídos como variáveis de estado. Conseqüentemente, para representar um disjuntor entre os nós i e j , os fluxos de potência ativa t_{ij} e reativa u_{ij} são incluídos no vetor de estados.

Caso o disjuntor a ser modelado esteja fechado, a diferença angular $\delta_i - \delta_j$ e a queda de tensão $V_i - V_j$ são consideradas nulas. Se o disjuntor estiver aberto, os fluxos ativo t_{ij} e reativo u_{ij} serão iguais a zero. Estas informações são inseridas no modelo matemático sob forma de restrições ao problema de estimação de estados. Tais restrições são chamadas de *restrições operacionais*, uma vez que um disjuntor pode ter seu status modificado de acordo com necessidades ditadas pelas condições de operação [3], e serão referenciadas genericamente na formulação da estimação de estados restrita por:

$$h_o(x) = 0 \quad (1)$$

onde $h_o(x)$ é um vetor $N_o \times 1$ de funções não-lineares que representam as restrições operacionais e x é o vetor $n \times 1$ de variáveis de estado, contendo tanto as variáveis nodais convencionais quanto os fluxos de potência ativa e reativa pelos disjuntores.

3. Restrições estruturais

Além das restrições operacionais, outras restrições podem surgir a partir da configuração física da rede. Em particular, pode-se citar as barras/nós de passagem, as quais obedecem as restrições de injeção de potência ativa e reativa nulas, ou seja, para a barra/nó de passagem i , $p_i=0$ e $q_i=0$. A escolha de uma barra i como referência angular para o sistema também pode ser modelada como uma restrição, sendo esta do tipo $\delta_i=0$. Estas restrições são chamadas *restrições estruturais* e serão genericamente referenciadas por:

$$h_s(x) = 0 \quad (2)$$

onde $h_s(x)$ é um vetor $N_s \times 1$ de funções não-lineares que representam as restrições estruturais.

4. Modelagem das telemidas analógicas

Adicionalmente, o modelo em tempo real deve incluir as telemidas analógicas provenientes do sistema de aquisição de dados. Estas são modeladas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} z_m &= h_m(x) + \varepsilon_m \quad (3) \\ E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} &= R_m \quad (4) \end{aligned}$$

onde $h_m(x)$ é o vetor $m \times 1$ de funções das medidas, ε_m é o vetor de mesma dimensão contendo os erros de medição e R_m é a matriz $m \times m$ de covariância dos erros de medição. $E\{\cdot\}$ representa o operador Valor Esperado.

5. Formulação da Estimação de Estados Generalizada

O problema de estimação de estados consiste na minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos de estimação. Considerando uma rede elétrica com N barras monitorada por m medidas e sendo n o número de estados, o problema de estimação de estados generalizada com a incorporação das restrições operacionais e estruturais pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \quad (5) \\ \text{Sujeito a} \quad & r_m = z_m - h_m(x) \\ & h_s(x) = 0 \\ & h_o(x) = 0 \end{aligned}$$

onde:

r_m : vetor de resíduos das medidas;

R_m : matriz de covariância dos erros de medição.

6. Modelagem de informações a priori

Conforme demonstrado em [3], o processamento de erros de topologia pode ser comprometido pela ocorrência de conjuntos críticos envolvendo restrições operacionais. Conjuntos críticos formados pelos status dos disjuntores são definidos pela topologia da rede, de modo que eles não podem ser eliminados

pelo simples acréscimo de medidas analógicas. Para melhorar o desempenho da identificação de erro de topologia nestes casos, informações prévias relativas às variáveis de estado são incluídas no problema de estimação. As informações *a priori* sobre os estados, \bar{x} , podem ser modeladas no problema de otimização através da adição do seguinte termo na função objetivo [6].

$$\frac{1}{2}(\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1}(\hat{x} - \bar{x}) \quad (6)$$

onde \hat{x} é o vetor aumentado das variáveis de estado e P a matriz de covariância dos estados *a priori*. Na ausência de melhores informações sobre valores *a priori* dos ângulos de tensão de barra θ , pode-se supor que estes são iguais a zero, i.e., $\bar{x}_{\theta_i} = 0$ rad. Para definir os valores correspondentes de covariância na matriz P , supõe-se que os \bar{x}_{θ_i} 's são não-correlacionados e uniformemente distribuídos no intervalo $[-\theta_{\text{lim}}, \theta_{\text{lim}}]$, onde θ_{lim} estabelece um limite superior para valores de θ em condições de regime permanente (por exemplo, $\theta_{\text{lim}} = \pi/2$). Um procedimento similar pode ser adotado para as variáveis de estado restantes.

Com a inclusão das informações *a priori*, conforme descrito acima, o problema de estimação de estados representado em (4) passa a ser tratado por:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \\ \text{Sujeito a} \quad & r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \\ & h_s(\hat{x}) = 0 \\ & h_o(\hat{x}) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

O problema de otimização apresentado acima é resolvido usando o algoritmo do *tableau* esparsa de Hachtel, que soluciona o sistema linear descrito em (8):

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}(\bar{x} - \hat{x}^k) \\ z - h(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde:

$$H = \begin{bmatrix} H_m \\ H_s \\ H_o \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_o \end{bmatrix},$$

$$r^k = \begin{bmatrix} Z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ -h_s(\hat{x}^k) \\ -h_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \text{ e } \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix}, \quad (9)$$

sendo λ_m , λ_s e λ_o os vetores de multiplicadores de Lagrange associados às medidas, às restrições estruturais e às restrições operacionais, respectivamente.

O multiplicador de Lagrange normalizado é definido [3] por:

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{v_{ii}}} \quad (10)$$

onde V é a matriz de covariância do vetor de multiplicadores de Lagrange, λ .

A matriz V pode ser obtida através da inversa da matriz de coeficientes da equação (8):

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix}^{-1} \quad (11)$$

Os multiplicadores de Lagrange normalizados são utilizados como uma ferramenta para detectar a existência de erros. A existência de multiplicadores de Lagrange normalizados com valores superiores a um limiar λ_i pré-estabelecido indica se existem erros na modelagem utilizada. Como a probabilidade de uma variável aleatória com distribuição normal unitária estar entre -3σ e $+3\sigma$ é de 99%, um valor típico para o limiar é de 3,0 desvios padrões.

7. Identificação de Erros de Topologia via Teste de Colinearidade

A interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange foi proposta em [5]. Esta interpretação inicia pela partição do vetor de multiplicadores de Lagrange λ em dois conjuntos: “suspeitos” e “verdadeiros”, de acordo com as magnitudes de seus valores

normalizados. A mesma partição é adotada para a matriz de covariância V . Seja λ_s e V_{SS} o vetor $n_s \times 1$ de multiplicadores de Lagrange suspeitos e a submatriz $n_s \times n_s$ correspondente de V . O procedimento proposto em [5] usa um teste simples para verificar a colinearidade entre λ e as colunas de V_{SS} , baseado em

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\lambda_s^T (V_{SS})^{-1} \lambda_s}{(\lambda R \lambda)}} \quad (12)$$

Se $\cos \theta \cong 1$, λ_s é colinear com as colunas de V_{SS} e portanto conclui-se que nenhum erro grosseiro foi processado. Se, por outro lado, $\cos \theta$ for significativamente menor do que 1, isto é uma indicação de que algumas das restrições suspeitas correspondem de fato a erros de topologia.

Este teste geométrico, referido daqui por diante como *teste do cosseno*, é utilizado aqui como o procedimento fundamental para todo o algoritmo de processamento de erros. Desta forma, não são necessários testes estatísticos adicionais para a identificação da configuração correta do sistema. A aplicação do teste do cosseno é feita em dois estágios. No primeiro estágio o teste é utilizado para garantir a inclusão de todos os disjuntores erroneamente modelados no conjunto suspeito, da mesma forma proposta em [5]. No segundo estágio, o teste do cosseno é aplicado para eliminar as informações livres de erro do conjunto suspeito. Ao final do processamento do algoritmo proposto, o conjunto suspeito será composto unicamente pelas restrições operacionais correspondentes aos disjuntores erroneamente modelados. O algoritmo proposto é apresentado na sequência, onde λ_t é o limiar para seleção de dispositivos cujos statuses são considerados suspeitos (valor típico: $\lambda_t=3,0$) e ϵ_{\cos} é um número positivo no intervalo $[0,01; 0,1]$.

Algoritmo:

1. Executar a estimação de estados generalizada e calcular os multiplicadores de Lagrange Normalizados para as restrições operacionais, (λ_o^N) ;

2. (*Detecção de Erros de Topologia*) Faça $\lambda_{o_MAX}^N = \max(\lambda_o^N)$. Se $\lambda_{o_MAX}^N \leq 3,0$ parar.

Em caso contrário, foram detectados erros de topologia, vá para o Passo 3;

3. (*Seleção de disjuntores suspeitos*) Selecionar como suspeitos todos os disjuntores para os quais $|\lambda_{o_i}^N| \geq \lambda_t$;

4. (*Teste do cosseno: Primeiro estágio*) Calcule o valor do cosseno usando Eq. (12):

- Se $\cos \theta > (1 - \epsilon_{\cos}) \Rightarrow$ todos os disjuntores errôneos estão incluídos no conjunto suspeito, vá para o Passo 5;
- Se $\cos \theta < (1 - \epsilon_{\cos}) \Rightarrow$ o conjunto suspeito não contém todas as informações errôneas. Reduza o limiar λ_t e volte para o Passo 3;

5. (*Teste do cosseno: Segundo estágio*) Remova temporariamente a informação i do conjunto suspeito e calcule novamente o valor de $\cos \theta$ (para $i=1, N_o$):

- Se $\cos \theta > (1 - \epsilon_{\cos})$, a informação i não contém erro e é eliminada definitivamente do conjunto suspeito;
- Se $\cos \theta < (1 - \epsilon_{\cos})$, a informação i contém erro de modelagem e permanece no conjunto suspeito.

6. (Fim)

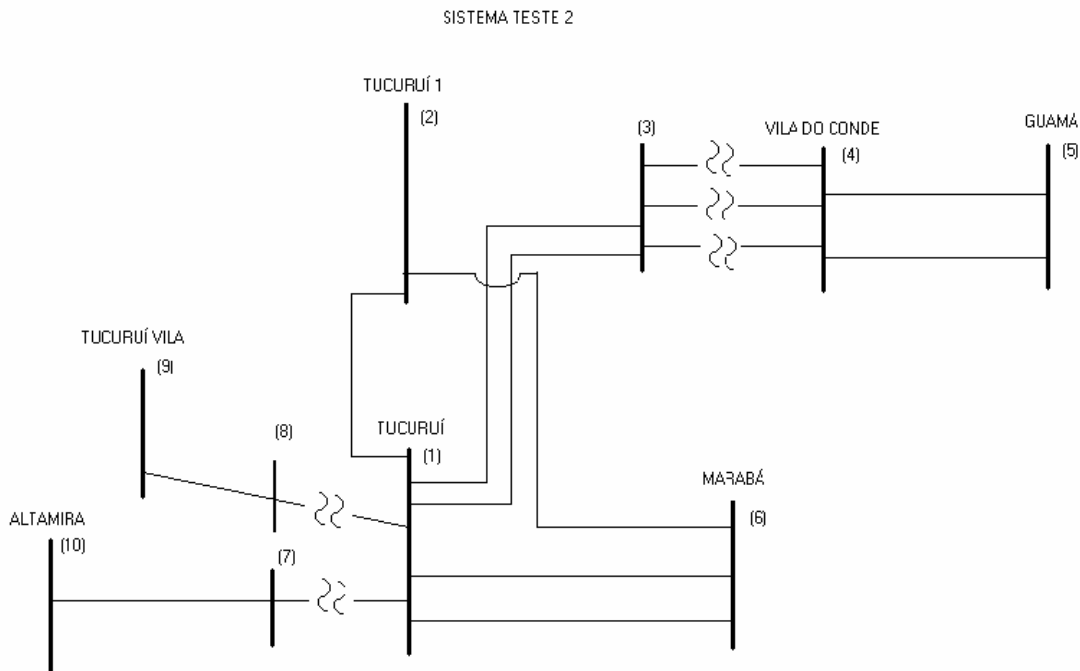
8. Resultados e Simulações

O estimador de estados generalizado foi desenvolvido considerando um modelo linear (DC) e um modelo não-linear (AC) para a rede elétrica. Ambas as versões (DC e AC) foram pré-validadas com sucesso utilizando-se sistemas-teste padrões do IEEE. Para a ELETRONORTE foram utilizados dois sistemas. O sistema-teste 1 é composto de duas subestações de porte relativamente pequeno, Marabá e Açailândia. Já o Sistema-teste 2 compreende duas subestações de grande porte da ELETRONORTE, Tucuruí e Vila do Conde. Dificuldades para a obtenção dos dados reais do sistema da Eletronorte não permitiram a realização de testes com a versão AC do programa.

Neste artigo serão apresentados os testes obtidos com o sistema-teste 2. O diagrama unifilar do

modelo barra-ramo deste sistema está apresentado na figura 1. Conforme discutido anteriormente, a identificação de erros de topologia é conduzida no nível de subestação, onde apenas as SE's suspeitas de apresentarem erro de modelagem são detalhadas. A figura 2 apresenta a modelagem detalhada do sistema-teste 2, onde as SE's Tucuruí e Vila do Conde

Note que cada ramo chaveável representado compreende um conjunto de chaves e disjuntores, cujo status final é definido pela combinação de suas configurações atuais. Por exemplo, o conjunto formado por um disjuntor aberto em série com uma chave seccionadora fechada é modelado por um ramo chaveável aberto.



estão representadas no nível de seção de barra.

Figura 1 - Diagrama unifilar ramo-barra do sistema ELETRONORTE em estudo

Diferentes tipos de testes foram simulados nas subestações selecionadas, considerando varias formas de erro de topologia:

- Erro de exclusão simples, duplo ou triplo: quando uma linha de transmissão que está em operação é inadvertidamente excluída do modelo do sistema através da modelagem errônea do status de 1, 2 ou 3 disjuntores, respectivamente;
- Erro de exclusão de transformador: quando um transformador é inadvertidamente excluído pela modelagem errônea dos disjuntores a ele conectados;
- Erro de exclusão de gerador: quando um gerador é erroneamente excluído do modelo do sistema;
- Erro de exclusão de carga: quando uma carga que está sendo de fato atendida pelo sistema é erroneamente excluída no modelo repassado ao estimador;
- Erro de *by-pass* simples ou duplo: quando um incorreto *by-pass* de subestação é reportado para o modelo do estimador de estados através da modelagem errônea de 1 ou 2 disjuntores, respectivamente.

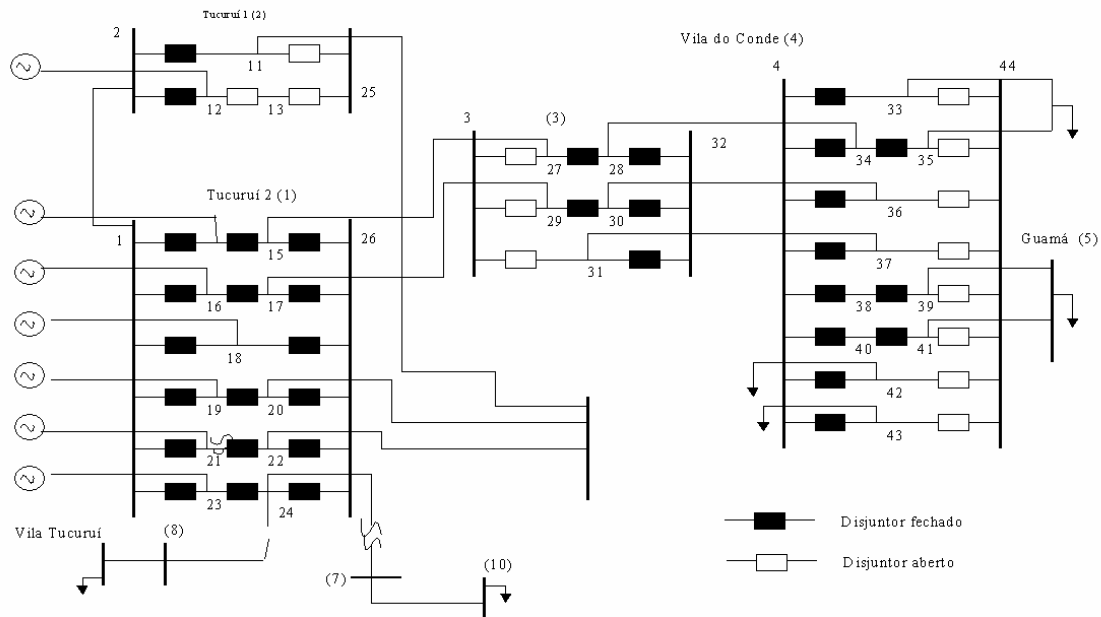


Figura 2 – Diagrama detalhado das ligações das SE's Tucuruí e Vila do Conde.

Adota-se medida de fluxo em todos os ramos convencionais (linhas de transmissão e transformadores) e medida de injeção em todas as barras do sistema. Além dessas, foram também incluídas no plano de medição, medida de fluxo através dos disjuntores: 2-11, 3-29 e 3-31. As medidas foram simuladas com variâncias em torno de 2% dos valores medidos. Restrições estruturais e operacionais e informações a priori foram modeladas conforme descrito na Seção 3. Os statuses correntes dos ramos chaveáveis estão representados na figura 2.

A tabela 1 descreve alguns dos resultados obtidos, seguindo o seguinte padrão: a

primeira coluna indica o tipo de erro e o elemento da rede envolvido, indicando as barras terminais do elemento no caso de linhas e transformadores. Na segunda coluna estão listados os disjuntores modelados erroneamente para o caso em questão. A terceira coluna resume os resultados do 1º estágio do teste do cosseno. Esta coluna está subdividida em 3 subcolunas: a primeira dessas, (3-1), indica o limiar final utilizado para garantir a inclusão de todos os disjuntores errôneos como suspeitos; a segunda subcoluna, (3-2), lista os componentes do conjunto suspeito, e a terceira delas, (3-3), mostra o valor final do cosseno,

Tabela 1- Resultados dos Estudos de Simulação

CASO	Disjuntores Errôneos	1° estágio			2° estágio	
		Limiar	Conjunto Suspeito	cos θ	Disjuntores Errôneos	cos θ
By-Pass Simples	4-34	3.0	4-34	0.9619	28-32	0.9619
Exclusão Duplo Linha 1-3 (15-27)	14-15 15-26	3.0	4 - 34 28 - 32 30 - 32 4 - 36 31 - 32 4 - 37 2 - 11 3 - 29 3 - 31 3 - 27 15-26 14-15	1.0000	15-26 *	1.0000
Exclusão de Carga - A	4-42	3.0	4-42	0.9999	4-42	0.9998
Exclusão de Trafo	31-32 4-37	0.5000	4-37 31-32 30-32 28-32 4-36 4-34 29-30 27-28 3-29 2-11 3-27	0.9999	31-32 4-37	0.9999
Exclusão de Gerador	1-21 21-22	3.0	4-34 29-30 27-28 4-36 30-32 31-32 4-37 3-29 3-31 3-27 22-26 2-11 1-21 21-22	1.0000	1-21 *	0.9999

(*) Conjunto Crítico formado pelos disjuntores errôneos

ou seja, o valor do cosseno obtido para o conjunto suspeito apresentado. A última coluna da tabela resume os resultados obtidos com a aplicação do segundo estágio do algoritmo proposto. Esta coluna encontra-se subdividida em duas

subcolunas: a primeira mostra o resultado final do processo de identificação via teste do cosseno, ou seja, apresenta os disjuntores identificados como errôneos; e a segunda mostra o valor do cosseno neste caso.

Os resultados apresentados indicam que o algoritmo proposto é eficiente na identificação dos erros desde que a criticidade de informações não seja muito restritiva. Na

ocorrência de conjuntos críticos envolvendo os disjuntores suspeitos, por exemplo, nem todos os disjuntores com status incorreto são identificados. Nestes casos, a configuração correta pode ser determinada testando-se as possíveis combinações de status para os componentes do conjunto crítico até que $|\lambda_{o_i}^N| < \lambda_t$. Este procedimento pode exigir esforço computacional adicional significativo, dependendo do número de disjuntores que compõe o conjunto crítico. Uma alternativa mais atraente seria aplicar procedimentos de identificação mais elaborados, como os testes de hipóteses apresentados em [5].

9. Integração do Estimador ao SAGE

Foi realizado um estudo para comunicação entre o SAGE e o Estimador, concluindo-se que pode ser realizado, porém será uma comunicação única, não podendo ser integrado nesse meio de comunicação qualquer outro sistema. Dessa forma, foi proposta, para futuros projetos, a utilização de soluções de *middleware* que tornem vantajosas e justificáveis nesse contexto, onde alguns dos problemas mais evidentes são a complexidade de comunicações e a integração de sistemas de suporte a decisão para adquirir parâmetros de entrada (dados) armazenados no Banco de Históricos do SAGE.

10. Conclusões

O algoritmo proposto mostrou-se eficiente em todos os casos simulados, mesmo em casos de baixa redundância ou incidência de conjuntos críticos. É importante ressaltar que o porte do sistema em estudo, composto por 49 disjuntores, é muito superior àqueles usualmente apresentados na literatura, o que torna os resultados obtidos ainda mais interessantes. Outro fator relevante relacionado ao porte do sistema-teste é a simplicidade do algoritmo proposto, que elimina a necessidade de testes estatísticos mais elaborados. Isto depõe a favor da viabilidade da aplicação do algoritmo em

ambientes de tempo real, mesmo para casos envolvendo um elevado número de disjuntores suspeitos, como os apresentados no relatório de conclusão do projeto.

10. Referências Bibliográficas

- [1] A. Monticelli and A. Garcia. "Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation". IEEE/PES Winter Meeting, 8(1):364-370, Feb. 1993.
- [2] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, and A. Monticelli. "Generalized State Estimation". IEEE Trans. on Power Systems, 13(3):1069-1075, Aug. 1998.
- [3] K. A. Clements and A. Simões Costa. "Topology Error Identification using Normalized Lagrange Multipliers". IEEE Trans. On Power Systems, 13(2):347-353, May 1998.
- [4] E. M. Lourenço, K. A. Clements, and A. J. A. Simões Costa. "Geometrically-Based Hypothesis Testing for Topology Error Identification". 14th Power System Computation Conference, Seville, Spain, Jun. 2002.
- [5] E. M. Lourenço, A. Simões Costa and K. A. Clements. "Bayesian-Based Hypothesis Testing for Topology Error Identification in Generalized State Estimation". IEEE/PES Trans. on Power System, 19(2):1206-1215, May. 2004.
- [6] E. M. Lourenço, A. J. A. Simões Costa, and K. A. Clements. "A Hybrid Probabilistic/Topological Approach to Topology Error Identification in Power System Real-Time Modeling". 7a PMAPS Conference, Naples, Italy, pages 105-110, Sep. 2002.
- [7] E. M. Lourenço. "Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimção de Estados Generalizada". Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Dezembro 2001.
- [8] A. Bose and K. A. Clements. "Real Time Modeling of Power Networks". Proceedings of the IEEE, 75(12):1607-1622, Dec. 1986.

