



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT 32
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

ESTIMAÇÃO DE MODOS DE OSCILAÇÃO A PARTIR DE SINAIS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑICOS: UMA APLICAÇÃO AO SISTEMA INTERLIGADO BRASILEIRO

F. D. Freitas * P. A. Berger N. Martins F. A. O. Nascimento L. F. J. Fernandes
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA CEPEL UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

RESUMO

Este trabalho descreve uma metodologia para determinação de características modais de um sistema de potência. A metodologia é baseada na identificação da resposta impulsional do sistema a partir de uma janela de dados. Técnicas utilizando transformada discreta de Fourier, wavelets e transformada z são empregadas como ferramentas nos cálculos. Sinais de excitação e medições são monitorados em localidades afastadas geograficamente a fim de se calcular as informações modais do sistema. A metodologia é testada em uma base de dados do sistema interligado nacional (SIN), relativo ao ano de 2005. Os resultados apontam para uma implementação satisfatória da técnica em tempo real.

PALAVRAS-CHAVE

Identificação de Sistemas, Modos de Oscilação, Estimação, Resíduos, FFT.

1.0 - INTRODUÇÃO

Estudos dinâmicos diversos são de fundamental importância no controle e segurança de sistemas de energia elétrica de grande porte. Ferramentas matemáticas avançadas com o potencial de identificar e caracterizar tais dinâmicas, mesmo em tempo real, têm sido investigadas recentemente (1,2,3). O aparecimento da medição fasorial sincronizada (PMU, sigla da expressão em Inglês: *Phasor Measurement Unit*) e, posteriormente, de redes de monitoração e controle baseados em PMU's (WAMS, sigla da expressão em Inglês: *Wide Area Monitoring System*) permitem obter registros digitais de variadas grandezas elétricas, com taxa de amostragem elevada, de modo que a identificação online de modelos dinâmicos do sistema tornou-se uma possibilidade concreta. Há métodos de estimação de sistemas (4) que possibilitam a determinação de alguns parâmetros dinâmicos em tempo real, que nos estudos convencionais são obtidos, em geral, de forma *off-line*. No entanto, com o enorme avanço da tecnologia digital, é possível se realizar operações algébricas antes inviáveis. Assim, técnicas numéricas utilizadas anteriormente, apenas para estudos *off-line*, são hoje combinadas a aplicações de processamento de sinais, produzindo informações em tempo real, que são processadas e utilizadas na monitoração da segurança dinâmica em tempo real.

Este artigo apresenta uma metodologia para estimação de modos de oscilação para um sistema de potência, considerando que determinados sinais desse sistema são acessíveis para medição. A técnica de estimação é aplicada para obtenção dos referidos modos no sistema interligado nacional (SIN). O procedimento consiste em

(*) Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, CEP: 70910-900 Brasília, DF – Brasil
Tel: (+55 61) 3273-5977 – Fax: (+55 61) 3274-6651 – Email: ffreitas@ene.unb.br

se aplicar pulsos de pequena amplitude e curta duração em determinados locais, e a partir de medições em outros locais afastados geograficamente, efetuar-se estimativas. Considera-se um conjunto de dados, os quais constituem um sinal que é capturado por um determinado intervalo finito de tempo. Vários intervalos de tempo podem ser considerados seqüencialmente, tornando assim o procedimento apropriado para monitoramento de parâmetros do sistema em tempo real. Os dados são supostos amostrados a uma taxa de amostragem constante, o que permite utilizá-los e tratá-los no domínio da transformada z . Por meio dessa transformada, o sinal é identificado, e com base nisso, extraem-se as informações sobre os parâmetros modais do sistema. Tendo em vista a estimação de parâmetros modais no SIN, são realizadas simulações transitórias sobre um banco de dados do sistema referente ao cenário carga pesada do ano 2005. Em seguida, procede-se à etapa de identificação de modos eletromecânicos. No processo de identificação, considera-se que o sinal seja misturado a ruído, o que é típico de sinais reais. As simulações transitórias são efetuadas no ANATEM, aplicativo desenvolvido pelo CEPEL e amplamente utilizado pelas empresas do setor elétrico brasileiro. Para o caso em que são utilizados sinais com considerável conteúdo de ruído, antes da estimação dos modos, aplica-se uma técnica de eliminação de ruído (*denoising*) que utiliza transformada *wavelets*. Embora os dados e cálculos para identificação dos modos sejam efetuados considerando-se tempo discreto, as informações finais são apresentadas na forma de tempo contínuo, ou no domínio da transformada de Laplace.

2.0 - IDENTIFICAÇÃO DE UMA FUNÇÃO IMPULSIONAL

A sistemática adotada neste trabalho requer, inicialmente, a identificação de funções impulsionais. Essas funções são calculadas a partir dos dados de um sinal de entrada e de um sinal de saída, situados em diferentes locais geográficos. Nesse processo, é considerada uma janela de dados de tamanho fixa, na qual considera-se que o sistema possa ser modelado por um sistema linear e invariante no tempo. A janela de dados começa a ser observada a partir do instante inicial t_0 terminando em t_f . Obviamente, assume-se que durante o intervalo $T_F = t_f - t_0$, o sistema seja submetido a entradas de controle, em alguns locais específicos, e os sinais de saída constituam um processo ergódico (4).

As entradas de controle constituem um sinal periódico, de período T_F , de baixa amplitude e duração, a fim de evitar interferência no desempenho do sinal de entrada principal. Considera-se que tais sinais sejam injetados na referência de controladores de determinados geradores do sistema interligado. Cada sinal periódico de entrada tem a seguinte característica (em forma de pulso) dentro da janela de dados:

$$u(t) = \begin{cases} A_0, & \text{se } t_0 \leq t \leq t_1 \\ 0, & \text{se } t_1 < t < T_F \end{cases} \quad (1)$$

Considerando-se o instante de tempo $t_1 \ll T_F$, e A_0 um valor muito baixo em relação à amplitude do sinal de referência de cada gerador, a energia desse sinal de excitação é desprezível diante do sinal de controle efetivo do gerador. Os instantes de aplicação dos pulsos podem ser selecionados de acordo com a melhor estratégia para identificação das funções impulsionais.

Os sinais de saída, dependendo da localização geográfica no sistema e a proximidade com um local no qual se tem excitação de entrada de controle, podem assumir amplitudes muito baixas, sendo o ruído nesse caso prejudicial ao processo de identificação.

Supõe-se que tanto sinais de entrada quanto de saídas sejam adequadamente amostrados a uma taxa de amostragem de período T , ou seja, frequência $F_s = 1/T$. Para fins de identificação das funções impulsionais, utiliza-se a transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) (5) na sua forma conhecida como *fast Fourier transform* (FFT), tanto para o sinal de entrada como para o de saída. A partir dessas informações, são calculadas funções de transferências associadas às entradas e saídas.

2.1 Transformada Discreta de Fourier e Funções de Transferência

A DFT, ferramenta muito utilizada na análise de sinais em tempo discreto, pode ser definida como (5):

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (3)$$

onde N é o número de amostras do sinal; $x[n]$, $0 \leq n \leq N - 1$, representa a seqüência amostrada no tempo; $X[k]$ corresponde à seqüência complexa de coeficientes de Fourier obtidos a partir da Transformada definida por $e^{jv} = \cos(v) + j\text{sen}(v)$, sendo v um número complexo, representando as diversas seqüências exponenciais complexas da base de Fourier. O termo $w_k = \frac{2\pi k}{N}$ é a freqüência correspondente à k -ésima amostra em freqüência.

A DFT $X[k]$ pode ser eficientemente implementada por meio da FFT. Enquanto a DFT apresenta complexidade computacional proporcional a N^2 , a FFT apresenta uma complexidade $N \log_2(N)$ (5). Calculando-se as DFTs $U[k]$ e $Y[k]$ de um sistema, é possível calcular a resposta impulsional $H[k]$, a partir da seguinte relação no domínio da freqüência:

$$Y[k] = H[k]U[k] \quad (4)$$

Como $H[k]$ é uma grandeza complexa, a sua magnitude e sua fase são determinadas como:

$$|H[k]| = \frac{|Y[k]|}{|U[k]|} \quad e \quad \angle H[k] = \angle Y[k] - \angle U[k] \quad (5)$$

A partir das equações (5) e (3), calcula-se uma seqüência discreta, $h[n]$, correspondente à resposta impulsional no tempo. Como, em geral, os sinais observados têm componentes de ruído, as grandezas envolvidas na expressão (5) também conterão componentes de ruído.

A presença do ruído dificulta a extração direta dos parâmetros que caracterizam a resposta impulsional do sistema. Dessa forma, torna-se necessário efetuar um processo de remoção ou minimização desse efeito a fim de se ter as informações satisfatórias do sistema identificado.

2.2 Processo de Minimização de Ruído

O processo de redução do efeito do ruído pode ser efetuado via transformada *wavelets*. A análise por intermédio dessa técnica baseia-se na concepção que qualquer sinal pode ser expandido em séries contendo uma base funcional chamada *wavelets*. A técnica de *wavelets* representa um método de janelas com dimensões de região variáveis. Isso permite o uso de pequenos intervalos de tempo para representar a informação de alta freqüência e longos intervalos de tempo para informação de baixa freqüência. Os sinais envolvidos são funções de uma variável contínua, expandidos em série. A partir dessa expansão, desenvolve-se uma versão em tempo discreto semelhante à DFT, conhecida como transformada *wavelet* discreta (DWT – *discrete wavelet transform*) (6).

Quando um sinal é submetido ao processo de DWT e os coeficientes da DWT abaixo de um certo valor são removidos, ao se efetuar o processo inverso (DWT inversa), recupera-se o sinal original a menos da parcela de ruído que foi eliminada ou minimizada. Denomina-se esse processo de *denoising* (6).

No caso, esse processo deve ser aplicado à resposta impulsional do sistema visando minimizar o efeito do ruído e assim possibilitar a identificação adequada das características modais do sistema. Essas características são determinadas considerando-se uma função de transferência no domínio da transformada z relativa à $h[n]$ (7).

3.0 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DOS SINAIS OBSERVADOS EM RELAÇÃO ÀS ENTRADAS

A transformada z da resposta ao impulso é igual à função de transferência entre os sinais de entrada e de saída, que no domínio de z será denominada $H(z)$. Caso exista uma seqüência dada por $\{h[0], h[1], \dots, h[m]\}$, sua transformada z é (5,6):

$$H(z) = \sum_{n=0}^m h[n]z^{-n} \quad (6)$$

A representação na forma de polinômio pode ser aproximada por uma fração racional definida por (7)

$$\hat{H}(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{(N-1)} z^{-(N-1)}}{1 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}} = \frac{a_0 z^N + a_1 z^{(N-1)} + a_2 z^{(N-2)} + \dots + a_{(N-1)} z}{z^N + b_1 z^{(N-1)} + \dots + b_N} \quad (7)$$

Naturalmente, $\hat{H}(z)$ é uma aproximação que pode ser diferente em certos intervalos em relação à $H(z)$.

Assume-se que todos os pólos do sistema identificado sejam diferentes (pólos simples). Esta hipótese é aceitável para o caso de funções de transferência para representação dinâmica de sistemas de potência para fins de análise de estabilidade a pequenos sinais. A equação (7) pode ser reescrita da forma abaixo, e expandida em frações parciais, na qual cada fração é composta por um resíduo e um pólo:

$$\hat{H}(z) = \frac{z[a_0z^{(N-1)} + a_1z^{(N-2)} + a_2z^{(N-3)} + \dots + a_{(N-1)}]}{z^N + b_1z^{(N-1)} + \dots + b_N} = \frac{zA(z)}{B(z)} = z \sum_{k=1}^N \frac{R_{z_k}}{z - z_k}. \quad (8)$$

onde R_{z_k} é o resíduo associado ao pólo z_k da função de transferência $A(z)/B(z)$. Portanto, cada resíduo é calculado como

$$R_{z_k} = \lim_{z \rightarrow z_k} \frac{A(z)}{B_z(z)}, \quad \text{sendo } B_z(z) = \frac{B(z)}{z - z_k} \quad (9)$$

Considerando a expressão (9), a equação (8) é rearranjada para

$$\hat{H}(z) = \sum_{k=1}^N \frac{zR_{z_k}}{z - z_k} \quad (10)$$

Cada termo do tipo $\hat{H}_k(z) = R_{z_k} \frac{z}{z - z_k}$ em (10) é equivalente à expressão $\hat{h}_k(nT) = R_{z_k} e^{a_k(nT)}$ no tempo

discreto, onde $z_k = e^{a_k T}$. Se considerarmos que a_k pode ser um número complexo, existirá também o termo complexo conjugado a_k^* , pois os polinômios do numerador e denominador da função de transferência apresentam coeficientes reais. Conseqüentemente, se fizermos $t=nT$, temos $\hat{h}_k(t) \approx R_{z_k} e^{a_k t}$, para $t>0$, em tempo contínuo. Então, a expressão (10) no domínio de Laplace é

$$\hat{H}(s) = \sum_{k=1}^N \frac{R_{z_k}}{s - s_k} \quad (11)$$

Cada pólo no domínio de s pode ser calculado usando o fato de que $z_k = e^{s_k T}$. Deste modo, pólos no domínio de s são $s_k = (1/T) \ln(z_k)$, para $k=1, \dots, N$. Na equação (11) podem surgir pólos espúrios devido a erro numérico ou a ruído não filtrado antes da etapa do processo de identificação. Pólos com tais características podem ser identificados no domínio da freqüência, e daí eliminados do conjunto que efetivamente deve compor o sinal. Desta maneira, a realização do sistema conforme equação (11) possui ordem menor ou igual a N . A Figura 1 sintetiza a seqüência dos procedimentos que devem ser efetuados visando a determinação dos modos dominantes a partir de sinais observados no sistema.



FIGURA 1 – Processo seqüencial para extração das características modais dominantes a partir de sinais de saída.

4.0 - TESTES E RESULTADOS

Testes foram efetuados no ANATEM (8) para gerar os sinais que são utilizados na identificação dos parâmetros modais de interesse. Foi considerado um cenário representativo do sistema interligado brasileiro relativo à carga pesada do ano 2005. As curvas geradas no ANATEM não contêm ruído, sendo este acrescentado posteriormente, aos sinais de saída, como ruído branco gaussiano com média zero, para simular sinais mais próximos aos que ocorrem efetivamente no campo. Na realidade, com esse procedimento, representam-se eventuais ruídos de medição. Esta modelagem, portanto, não leva em conta as perturbações aleatórias devido às cargas e outros distúrbios internos ao sistema interligado.

Utilizaram-se dois locais de excitação para efeito do levantamento das funções de transferência e, conseqüentemente, para determinação dos seus pólos e resíduos. Os dois locais de excitação escolhidos foram os sinais de referência dos reguladores de tensão dos geradores de Itaipu e de Xingó. Ambos geradores estão localizados em regiões geográficas e elétricas bastante afastadas entre si. Esta estratégia permite excitar os modos interárea do sistema bem como os das áreas locais. Cada pulso, de acordo com a expressão (1), tem amplitude igual a 0,01 pu e duração de 0,02 s. Os pulsos foram aplicados sincronizadamente, a partir de mesmo instante de tempo, porém com polaridades invertidas. A polaridade inversa de um pulso em relação ao outro contribui para maior amplitude dos sinais observados, uma vez que há oscilações entre área, reforçando a relação sinal-ruído. A simulação efetuada no ANATEM foi realizada com passo de integração igual a 0,001 s, mas considerou-se que as curvas são amostradas (observadas) a cada 0,02 s, o que é equivalente a uma freqüência de amostragem igual a 50 Hz. A janela de dados observada tem 4096 pontos, o que para o período de

amostragem citado corresponde ao tempo de simulação T_F de 81,92 s. Para efeito de simulação da medição, essa janela de dados, e respectivos cálculos, repetem-se ciclicamente, ao longo do tempo, após o período T_F , caracterizando assim um processo que pode ser implementado *on-line*. Ao longo desse período de observação foram aplicados dois pulsos em instantes distintos separados ao equivalente a 2048 amostras (primeiro pulso injetado no instante zero e o segundo no instante 40,96 s).

Espera-se que até cerca de 40 s o sistema tenha se restabelecido devido à primeira perturbação. Então, com isso, torna-se possível calcular funções de transferências aproximadas relacionando os sinais medidos e um sinal de entrada. O mesmo procedimento é repetido a partir da amostra 2049, e assim sucessivamente para dados subsequentes à amostra 4096, até que algum comando de parada seja ativado. Uma melhor quantificação da amplitude esperada do sinal e do melhor local de medição no sistema podem ser avaliados calculando-se, previamente, os resíduos do sistema (9). No entanto, neste trabalho, priorizou-se a observação dos modos dominantes em baixas frequências. Desta forma, o monitoramento dos sinais de saída foi realizado em locais da interligação Norte-Sul. No entanto, outras observações foram consideradas em outros locais em diferentes partes do sistema.

Em todas as simulações, as medições são de fluxo de potência ativa em um dos terminais de linha de transmissão (primeiro terminal). Na interligação Norte-Sul, os fluxos foram monitorados nos seguintes trechos, em 500 kV: Gurupi-Serra da Mesa, Colinas-Imperatriz e Miracema-Colinas. Nestes circuitos, os fluxos ativos em regime permanente eram: 1041, -633 e -621 MW, respectivamente. Outras interligações consideradas foram: Assis 440 kV – Sumaré 440 kV, Caxias 525 kV – Gravataí 525 kV, Fortaleza 230 kV – Caupe 230 kV e Tucuruí 525 kV – Vila do Conde 525 kV. Os fluxos iniciais nessas interligações, em MW, eram 711,18, 458,06, -34,25 e 806,10, respectivamente. Os dados em pu, considerados mais adiante, estão em uma base de 100 MVA.

Todos os dados das figuras que se seguem são desvios em pu em relação às informações do ponto de operação citado anteriormente. A Figura 2 mostra o desvio de fluxo de potência na interligação Gurupi-Serra da Mesa. Note-se que durante os primeiros transitórios, que ocorrem até cerca de 10 s, o sinal é relativamente forte. O sinal de saída é caracterizado por baixa amplitude, mesmo durante o transitório, confirmando assim que o distúrbio não causa problema ao funcionamento normal do sistema. O desvio de fluxo pode ser interpretado como sendo uma parcela devido à excitação de entrada em Itaipu somada à outra que é devida à excitação em Xingó. Ou seja, no domínio da frequência, corresponde a um sinal $Y(j\omega)$, definido como $Y(j\omega) = H_1(j\omega)U_1(j\omega) + H_2(j\omega)U_2(j\omega)$. Sendo $U_1(j\omega) = -U_2(j\omega) = U(j\omega)$, então $Y(j\omega) = [H_1(j\omega) - H_2(j\omega)]U(j\omega) = H(j\omega)U(j\omega)$. Neste caso, $H(j\omega)$ é uma função de transferência relacionando a saída $Y(j\omega)$ e entrada $U(j\omega)$.

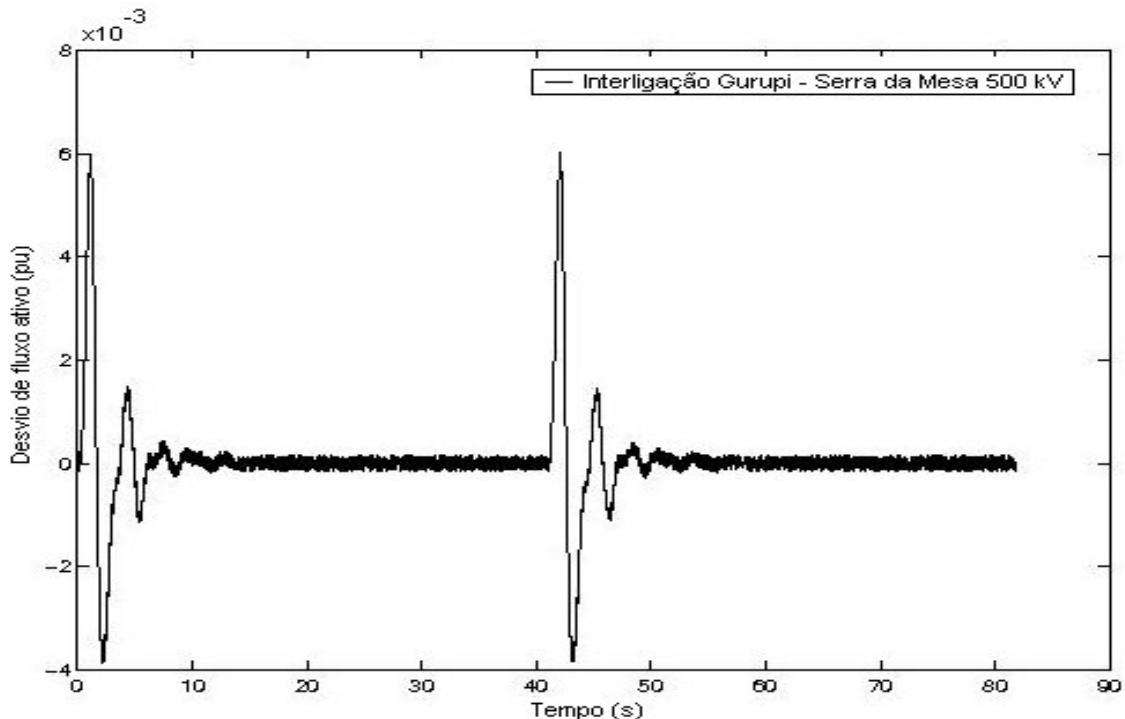


FIGURA 2 – Sinal de saída observado na interligação Gurupi – Serra da Mesa, 500 kV

Por sua vez, a identificação da resposta impulsional $h[n]$, no domínio do tempo discreto, é realizada calculando-se as FFTs dos sinais de entrada e de saída. Então, a partir das expressões na equação (5), calculam-se uma função de transferência $H[k]$. Como são aplicados dois pulsos ao longo da janela de dados, essa janela pode ser desmembrada em duas, possibilitando uma análise como se fossem duas janelas separadas. Ambas as janelas foram feitas iguais a 2048 amostras. A Figura 3 mostra a função impulsional das primeiras 2048 amostras para a

interligação Gurupi – Serra da Mesa. Note-se que a presença de ruído no sinal observado leva, inicialmente, a uma resposta impulsional também ruidosa.

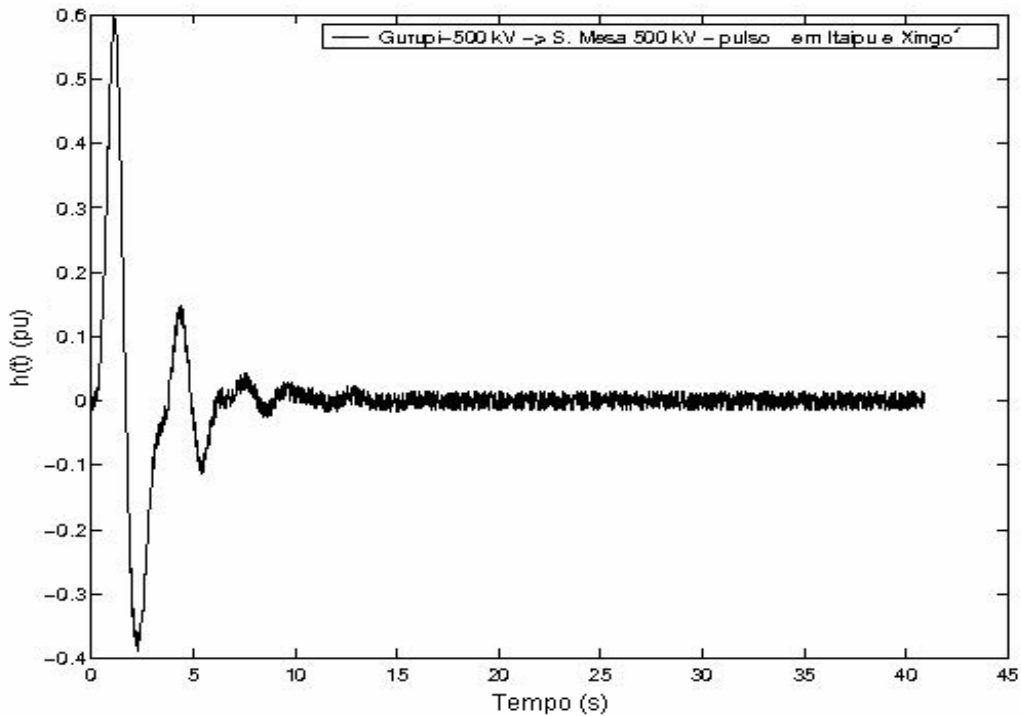


FIGURA 3 – Resposta ao impulso calculada – perturbação aplicada em Itaipu e Xingó

Uma vez que os sinais contêm ruído, aplica-se processo de *denoising* a fim de minimizar o seu efeito. A Figura 4 exibe a curva resultante, referente ao processo de *denoising* da função impulsional para as primeiras 2048 amostras correspondentes à resposta impulsional apresentada na Figura 3. A resposta impulsional (ideal) calculada para o caso em que o ruído é desconsiderado também é mostrada na Figura 4. O sinal sem ruído é mostrado a fim de se ter uma referência para aferição da qualidade do processo de determinação da resposta impulsional em ambiente ruidoso.

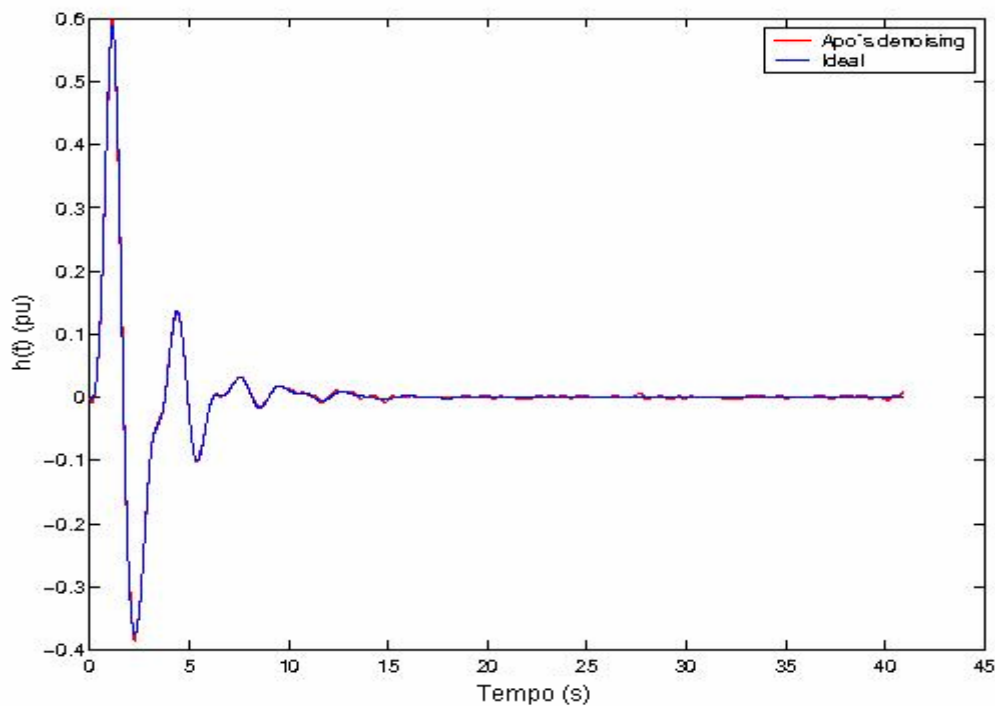


FIGURA 4 – Resposta ao impulso após processo de *denoising*

Após o processo de *denoising* foram identificadas funções de transferência correspondentes às respostas impulsional e calculados os pólos e resíduos associados. A Figura 5 mostra a resposta ao impulso, referente à

curva da Figura 4. Observe-se que a identificação da resposta impulsional é bastante próxima da resposta impulsional considerada ideal. Essa constatação confirma que as curvas foram identificadas adequadamente, apesar da característica ruidosa do sinal monitorado. Testes semelhantes foram realizados com medições nas demais interligações citadas anteriormente, sendo os resultados semelhantes em termos de identificação do sistema.

A fim de se extrair os parâmetros modais das curvas identificadas, foram calculados os pólos e os resíduos associados às funções de transferência avaliadas.

As Tabelas de 1 a 3 mostram os pólos dominantes, os resíduos e o valor absoluto dos índices de dominância modal (IDMs) (4) calculados a partir das funções de transferência identificadas para a interligação Norte-Sul. Foram mantidos todos os pólos cujos IDMs individuais, em valor absoluto, são superiores a 0,4%. Sempre foi considerada a identificação para as 2048 amostras iniciais e uma outra identificação para as demais 2048 amostras do período observado (total de 4096 amostras). Em todos os casos, foi obtida uma quantidade bastante reduzida de modos característicos para aproximar às respostas impulsionais. Esse resultado também foi constatado observando-se a resposta no tempo, considerando somente os modos dominantes calculados e a resposta impulsional sem ruído. A Figura 5 mostra a resposta impulsional final identificada e a resposta impulsional considerada ideal, determinada quando o ruído é totalmente desconsiderado.

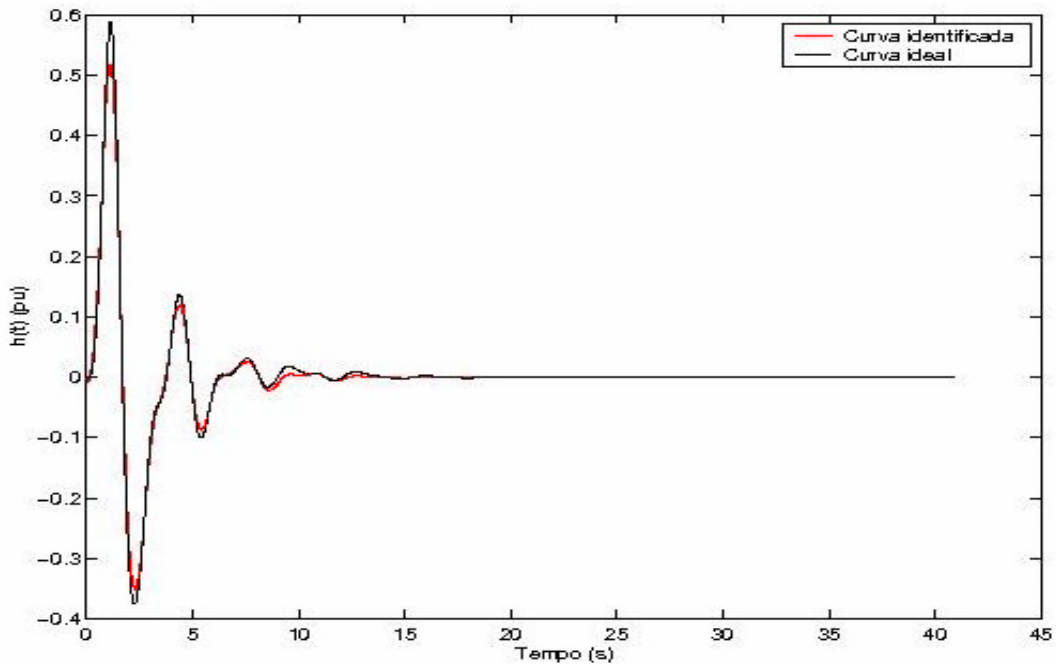


FIGURA 5 – Resposta ao impulso identificada e ideal - interligação Gurupi-Serra da Mesa

TABELA 1 – Fluxo observado em Miracema, interligação Gurupi-Serra da Mesa 500 kV

Primeira parte da curva			Segunda parte da curva		
Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)	Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)
$-0,276 \pm j 0,417$	$19,4 \pm j 39,8$	29,6	$-0,308 \pm j 0,422$	$-18,4 \pm j 41,8$	26,8
$-0,389 \pm j 2,144$	$-166,7 \mp j 95,6$	10,0	$-0,409 \pm j 3,924$	$80,5 \pm j 111,8$	8,2
$-0,394 \pm j 3,898$	$62,6 \pm j 108,5$	8,8	$-0,428 \pm j 2,143$	$240,1 \mp j 91,6$	6,2
$-0,440 \pm j 5,094$	$5,8 \pm j 15,6$	1,0	$-0,693 \pm j 1,678$	$234,6 \mp j 237,9$	53,6
$-0,569 \pm j 1,706$	$107,2 \mp j 243,2$	49,8	$-0,746 \pm j 5,085$	$22,0 \pm j 47,8$	2,7

TABELA 2 – Fluxo observado em Colinas, interligação Colinas-Imperatriz 500 kV

Primeira parte da curva			Segunda parte da curva		
Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)	Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)
$-0,281 \pm j 0,512$	$0,2 \mp j 39,0$	9,0	$-0,293 \pm j 0,536$	$-4,9 \mp j 41,4$	8,6
$-0,314 \pm j 1,640$	$125,7 \mp j 327,2$	31,6	$-0,302 \pm j 1,654$	$78,4 \mp j 330,2$	31,4
$-0,344 \pm j 2,047$	$90,3 \pm j 650,8$	46,1	$-0,349 \pm j 2,057$	$135,0 \pm j 631,1$	44,8
$-0,379 \pm j 3,881$	$-70,1 \mp j 121,7$	4,4	$-0,384 \pm j 3,880$	$-72,0 \mp j 125,1$	4,7
-3,3611	-0,3406	7,7	-2,868	-0,4	9,2

TABELA 3 – Fluxo observado em Miracema, interligação Miracema-Colinas 500 kV

Primeira parte da curva			Segunda parte da curva		
Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)	Pólo	Resíduo ($\times 10^{-3}$)	IDM (%)
-0,380	2,1	1,6	-0,318	3,2	2,9
$-0,389 \pm j3,890$	$-61,6 \mp j116,8$	16,8	$-0,390 \pm j3,888$	$-62,5 \mp j115,0$	16,2
$-0,409 \pm j2,108$	$186,3 \pm j223,9$	51,2	$-0,399 \pm j2,108$	$169,9 \pm j220,5$	50,8
$-0,511 \pm j5,028$	$-3,2 \mp j22,4$	2,6	$-0,487 \pm j1,499$	$-166,2 \mp j6,8$	16,8
$-0,5292 \pm j1,505$	$-189,6 \mp j17,2$	17,3	$-0,521 \pm j5,136$	$-8,8 \mp j20,8$	2,2
$-0,8452 \pm j6,555$	$18,9 \pm j11,6$	0,8	$-1,053 \pm j6,487$	$22,6 \pm j20,9$	1,6
$-6,075 \pm j2,631$	$45,9 \mp j153,5$	9,2	$-3,681 \pm j4,520$	$44,1 \mp j79,2$	9,0

A partir dos dados das tabelas, é possível observar a presença de modos característicos relacionados ao sistema interligado brasileiro. Em particular, os de baixas frequências são os dominantes. Os modos calculados estão de acordo com aqueles usualmente determinados por meio de ferramentas que exploram técnicas lineares.

5.0 - CONCLUSÃO

Foi apresentado um método para identificação de respostas impulsionalis a partir da aplicação de sinais de perturbação de pequena amplitude no sistema e da observação de sinais em determinados locais. A partir da resposta impulsional identificada, é possível extrair parâmetros modais tais como pólos dominantes, resíduos, permitindo assim calcular os modos dominantes do sistema. A técnica foi aplicada ao SIN, utilizando-se cenário de carga pesada relativo ao ano 2005.

As simulações, considerando a representação usual para análise de transitórios eletromecânica do SIN, indicam que, aplicando-se pequenos distúrbios em alguns locais do sistema, é possível realizar a identificação modal proposta. Cite-se que essas pequenas perturbações não comprometeriam o desempenho do sistema e não seriam prejudiciais ao funcionamento de equipamentos, tendo em vista a amplitude verificada.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) KAMWA, I., TRUDEL, G., GERIN-LAJOIE, L., Low-order Black-box Models for Control System Design in Large Power Systems. IEEE Trans. on Power Systems, v. 11, n. 1, pp. 303-311, February 1996.
- (2) KAMWA, I., GRONDIN, R., PMU Configuration for System Dynamic Performance Measurement in Large Multiarea Power Systems. IEEE Trans. on Power Systems, v. 17, n. 2, pp. 385-394, May 2002.
- (3) ZHOU, N., PIERRE, J. W., HAUER, J. F., Initial Results in Power System Identification From Injected Probing Signals Using a Subspace Method. IEEE Trans. on Power Systems, v. 21, n. 3, pp. 1296-1302, August 2006.
- (4) AGUIRRE, L. A., Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG, 2ª ed., 2004.
- (5) DINIZ, P. S. R., da SILVA, E. A. B., Processamento Digital de Sinais. Bookman Companhia Ed., 2004.
- (6) BURRUS, C. S., GOPINATH, R. A., H. GUO., Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: a Primer. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1998.
- (7) FREITAS, F. D., FERNANDES, L. F. J., MARTINS, N., Power Systems Transfer Function Identification of Output Noisy Signals. , X SEPOPE, SP 141, Florianópolis-SC, 2004.
- (8) ANATEM, Manual do Usuario, CEPEL, 2006.
- (9) MARTINS, N., LIMA, L. T. G., Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems. IEEE Trans. on Power Systems, v. 5, n. 4, pp. 1455-1469, November 1990.