

Identificação estocástica de subespaços de torres de linhas de transmissão de alta voltagem

Leandro Fleck Fadel Miguel^{1*}, Ruy C. Ramos de Menezes², Leticia Fleck Fadel Miguel³

Resumo

A busca por um entendimento do comportamento estrutural de forma mais detalhada, assim como o crescente interesse em áreas como monitoramento da integridade estrutural e projeto de sistemas de controle de vibração, tem mostrado a importância da utilização de métodos robustos e confiáveis, que sejam capazes de determinar as características dinâmicas de estruturas a partir do conhecimento unicamente de valores de resposta. Tipicamente, em torres metálicas de linhas de transmissão torna-se prático e economicamente interessante que os testes dinâmicos possam ser conduzidos utilizando-se de fatores naturais como vento e sismos como fonte de excitação da estrutura. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo numérico comparativo entre dois algoritmos e três variantes do Método de Identificação Estocástica de Subespaço, inicialmente apresentado por Van Overschee and de Moor (1993). Este método permite a determinação das características modais diretamente a partir da resposta, sem a necessidade do prévio cálculo das covariâncias ou dos parâmetros de Markov do sistema. Simulações numéricas de ensaios experimentais são realizadas em duas torres de linhas de transmissão reais para situações de vibrações livres e vibrações aleatórias estacionárias. Os resultados identificados são comparados àqueles esperados para um modelo em elementos finitos das torres em estudo.

Palavras-chave: Identificação de sistemas. Torre metálica de linha de transmissão.

^{1*} Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil. Av. Osvaldo Aranha 99, 3º andar, CEP 90035-190, Porto Alegre - RS, Brasil. Tel: +55 51 33083592. E-mail: leandro.miguel@ufrgs.br. * Autor correspondente.

² Prof. Dr.techn. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil. Av. Osvaldo Aranha 99, 3º andar, CEP 90035-190, Porto Alegre - RS, Brasil. Tel: +55 51 33083592. E-mail: ruymenezes@ppgce.ufrgs.br.

³ Prof^º Dr^ª Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica. Rua Sarmento Leite 425, 2º andar, CEP 90050-170, Porto Alegre - RS, Brasil. Tel: +55 51 33084502. E-mail: letffm@ufrgs.br.

1 Introdução

Inesperados acidentes de grandes proporções em estruturas de linhas de transmissão (LT), como os acontecidos no Canadá e na França no final da década de 1990, evidenciaram que um maior número de medições de campo deve ser realizado para um melhor entendimento de algumas questões ligadas à análise estrutural, consideradas anteriormente menos importantes, tais como a validade de carregamentos dinâmicos considerados como estáticos equivalentes, a influência do amortecimento estrutural das torres metálicas e dos cabos, entre outras.

Uma abordagem numérica, geralmente em elementos finitos, representa uma alternativa confiável para a obtenção da resposta da estrutura. Entretanto, alguns conceitos teóricos envolvidos nos cálculos incorporam algumas simplificações, como no caso do amortecimento, por exemplo, fazendo com que o comportamento real da estrutura possa não ser reproduzido de maneira precisa. Dessa forma, procedimentos experimentais possuem um papel fundamental, pois avaliam a extensão na qual as previsões teóricas são coincidentes com estes resultados. Alguns aspectos do comportamento da estrutura não podem ser previstos na totalidade e somente ficam claros pela realização de ensaios dinâmicos.

Neste aspecto, a identificação de sistemas está inserida nesse contexto, pois tem como objetivo a solução do problema inverso, isto é, a determinação de um sistema que descreva a relação entre uma entrada e saída ou somente uma saída conhecida. Em outras palavras, a identificação de sistemas pode ser definida como o processo no qual se determina um modelo matemático de um sistema dinâmico a partir de dados experimentais.

Além disso, o contínuo aprimoramento dos sistemas de aquisição de dados vem provocando um crescente interesse em áreas como monitoramento da integridade estrutural e projeto de sistemas de controle de vibração. Para estes estudos, a identificação de sistemas também está diretamente relacionada, pois as propriedades espectrais da estrutura devem ser obtidas da forma mais precisa possível, quer para avaliar seu corrente estado sem interromper sua operação quer para determinar qual foi o aumento da razão de amortecimento após a instalação do sistema de controle.

Dessa forma, para a obtenção dos parâmetros modais da estrutura, ensaios dinâmicos devem ser realizados. Para estruturas como as torres de LT, do ponto de vista prático e econômico, torna-se extremamente interessante a utilização de fatores naturais como vento e sismos como fonte de excitação da estrutura. Por esse motivo, métodos confiáveis e robustos, que sejam capazes de determinar as propriedades dinâmicas somente a partir de dados de resposta da estrutura, são extremamente necessários. Essas situações, nas quais a estrutura é excitada por um carregamento não mensurado e somente medições das saídas são disponíveis, têm sido referidas como identificação estocástica de sistemas.

Neste trabalho realiza-se um estudo comparativo em duas torres metálicas de LT reais, entre dois algoritmos e três variantes do Método de Identificação Estocástica

de Subespaço, inicialmente apresentado por Van Overschee and de Moor (1993) para aplicações em Engenharia Elétrica. Esse método, desenvolvido no domínio do tempo, é baseado na teoria da realização e permite a determinação das características modais através de um modelo no espaço de estado diretamente a partir dos dados de resposta. Peeters and de Roeck (1999), utilizando os algoritmos de Van Overschee and de Moor (1993), introduziram o conceito de sensores de referência na formulação, permitindo a redução das dimensões das matrizes e, assim, do tempo computacional. Entretanto, deve-se tomar muito cuidado com a seleção desses sensores de referência, pois a qualidade dos resultados pode acabar prejudicada.

2 Método de identificação estocástica de subespaço (SSI)

O método de identificação descrito (os nomes, abreviações e descrições do algoritmo apresentado nesta seção correspondem à convenção de Peeters, 1999) parte de um modelo estocástico no espaço de estado em tempo discreto dado na Equação (1):

$$\begin{aligned}\bar{x}(k+1) &= A\bar{x}(k) + \bar{w}(k) \\ \bar{y}(k) &= C\bar{x}(k) + \bar{v}(k)\end{aligned}\tag{1}$$

sendo o inteiro k o índice do tempo discreto no instante $t = k\Delta t$, $\bar{x}(k)$ é o vetor de estado, $\bar{y}(k)$ é o vetor de medição nas saídas, A é a matriz de estado e C é a matriz de localização das saídas. Os vetores $\bar{w}(k)$ e $\bar{v}(k)$ representam, respectivamente, o ruído devido às perturbações e imprecisões do modelo dinâmico e o ruído de medição devido à imprecisão do sistema de aquisição. Ambos são sinais não mensuráveis, modelados como ruído branco gaussiano com média zero e matriz de covariância dada na Eq. (2):

$$E\left[\begin{pmatrix} \bar{w}_p \\ \bar{v}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{w}_q^T & \bar{v}_q^T \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} \delta_{pq}\tag{2}$$

em que E é o valor esperado, δ_{pq} o delta de Kronecker, p e q são dois instantes arbitrários de tempo e Q , R e S são matrizes de covariância do ruído. Do ponto de vista de identificação estocástica de sistemas, como não é possível distinguir na Eq. (1) a excitação dos termos $\bar{w}(k)$ e $\bar{v}(k)$, ela é modelada implicitamente em termos de ruído, considerando-se a hipótese de que se comporta como um sinal do tipo ruído branco estacionário com média zero.

Uma propriedade fundamental desses sistemas diz que as covariâncias das saídas podem ser consideradas como os parâmetros de Markov do caso determinístico, constituindo a solução da identificação estocástica: a seqüência de covariâncias das respostas estimada a partir de dados de medição pode ser decomposta nas matrizes em espaço de estado do sistema.

A principal característica dos métodos de identificação estocástica de subespaços (SSI) é que evitam este prévio cálculo das covariâncias entre respostas. A idéia é calcular a projeção do bloco de linhas correspondentes às saídas futuras no espaço das saídas de referências passadas e, assim, reter toda a informação no passado que é útil para prever o futuro. Neste método, o nome “subespaço” reflete o fato de que os modelos podem ser obtidos através de espaços linha e coluna de certas matrizes, determinadas a partir de dados de entrada e saída ou somente saída do sistema. Tipicamente, o espaço coluna destas matrizes de dados contém informação sobre o modelo, ao passo que o espaço linha permite a obtenção de uma seqüência de estado (Van Overschee e de Moor, 1993).

Para o desenvolvimento do método devem-se agrupar as repostas numa matriz bloco Hankel, composta por $2i$ linhas blocos e N colunas, sendo $N \rightarrow \infty$ o número de amostras de tempo. A matriz $\mathbf{H}^{ref} \in R^{(r+l)i \times N}$ pode ser dividida em uma parte de referências passadas e uma parte futura, conforme mostrado na Eq. (3):

$$\mathbf{H}^{ref} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} y_0^{ref} & y_1^{ref} & \cdots & y_{N-1}^{ref} \\ y_1^{ref} & y_2^{ref} & \cdots & y_N^{ref} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1}^{ref} & y_i^{ref} & \cdots & y_{i+N-2}^{ref} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+N-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+N-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{0|i-1}^{ref} \\ \mathbf{Y}_{i|2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{ref} \\ \mathbf{Y}_f \end{bmatrix} \begin{matrix} \Downarrow ri \\ \Downarrow li \end{matrix} \quad (3)$$

Os subscritos p e f referem-se ao passado e futuro, respectivamente. Pode-se obter outra divisão de \mathbf{H}^{ref} acrescentando uma linha bloco às referências passadas e omitindo a primeira linha bloco das saídas futuras, segundo Eq. (4):

$$\mathbf{H}^{ref} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{0|i}^{ref} \\ \mathbf{Y}_{i|i} \\ \mathbf{Y}_{i+1|2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_p^{ref+} \\ \mathbf{Y}_{i|i}^{-ref} \\ \mathbf{Y}_f^- \end{bmatrix} \begin{matrix} \Downarrow r(i+1) \\ \Downarrow l-r \\ \Downarrow l(i-1) \end{matrix} \quad (4)$$

A idéia do método SSI é projetar o bloco de linhas correspondentes às saídas futuras no espaço das saídas de referência passadas e, assim, reter toda a informação no passado que é útil para prever o futuro. Essa projeção é definida como Eq. (5):

$$\mathbf{P}_i^{ref} \equiv \mathbf{Y}_f / \mathbf{Y}_p^{ref} \equiv \mathbf{Y}_f (\mathbf{Y}_p^{ref})^T (\mathbf{Y}_p^{ref} (\mathbf{Y}_p^{ref})^T)^{\dagger} \mathbf{Y}_p^{ref} \quad (5)$$

Esta equação representa a definição da projeção ortogonal $P_i^{ref} \in R^{l \times N}$, em que o símbolo $(\circ)^\dagger$ define a **pseudo**-inversa (Moore-Penrose) de uma matriz. O cálculo, entretanto, pode ser feito de uma maneira muito eficiente pela aplicação da decomposição QR na matriz Hankel, conduzindo a uma expressão simples para a projeção dada na Eq. (6):

$$H^{ref} = \begin{bmatrix} Y_p^{ref} \\ Y_f \end{bmatrix} = RQ^T, \quad P_i^{ref} = \begin{bmatrix} R_{21} \\ R_{31} \\ R_{41} \end{bmatrix} Q_1^T \quad (6)$$

O principal teorema da identificação estocástica de subespaços diz que a projeção P_i^{ref} pode ser decomposta em um produto da matriz observabilidade estendida O_i pela seqüência de estado do filtro Kalman \hat{X}_i , conforme Eq. (7).

$$P_i^{ref} = O_i \hat{X}_i \equiv \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \dots \\ CA^{i-l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i & \hat{x}_{i+1} & \dots & \hat{x}_{i+N-1} \end{bmatrix} \downarrow n \quad (7)$$

Com a decomposição em valores singulares (SVD) da matriz de projeção, pode-se estimar a sua ordem. A matriz de observabilidade estendida e a seqüência de estado do filtro Kalman são obtidas dividindo-se essa decomposição em duas partes, como mostra a Eq. (8):

$$\begin{aligned} P_i^{ref} &= U_1 S_1 V_1^T \\ O_i &= U_1 S_1^{1/2} \\ \hat{X}_i &= O_i^\dagger P_i^{ref} \end{aligned} \quad (8)$$

sendo $U_1 \in R^{l \times n}$ e $V_1 \in R^{N \times n}$ duas matrizes ortonormais; $S_1 \in (R_0^+)^{n \times n}$ é uma matriz diagonal contendo os valores singulares positivos em ordem decrescente. O posto é encontrado como o número de valores singulares diferentes de zero. Para a obtenção das matrizes do sistema podem ser utilizados dois algoritmos:

Utilizando os estados:

A partir da matriz Hankel, uma outra projeção pode ser definida na Eq.(9):

$$P_{i-1}^{ref} \equiv Y_f^- / Y_p^{ref+} = \begin{bmatrix} R_{41} & R_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1^T \\ Q_2^T \end{bmatrix} = O_{i-1} \hat{X}_{i+1} \quad (9)$$

A matriz de observabilidade O_{i-1} é obtida desprezando-se as l últimas linhas de O_i , e a seqüência de estado \hat{X}_{i+1} é calculada através da equação (10):

$$\widehat{\mathbf{X}}_{i+1} = \mathbf{O}_{i-1}^\dagger \mathbf{P}_{i-1}^{ref} \quad (10)$$

Assim, as matrizes \mathbf{A} e \mathbf{C} do sistema podem ser determinadas a partir do sistema de equações lineares da Eq. (11):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{il} \end{bmatrix} \widehat{\mathbf{X}}_i^\dagger \quad (11)$$

- Utilizando as matrizes estendidas:

As matrizes \mathbf{A} e \mathbf{C} podem ser obtidas diretamente a partir da matriz de observabilidade estendida dada na Eq. (8). Definindo a matriz $\underline{\mathbf{O}}_i = \mathbf{O}_{i-1}$, obtida descartando as últimas l linhas de \mathbf{O}_i , e a matriz $\overline{\mathbf{O}}_i$, obtida descartando as primeiras l linhas de \mathbf{O}_i , tem-se a Eq.(12):

$$\mathbf{A} = \underline{\mathbf{O}}_i^\dagger \overline{\mathbf{O}}_i \quad (12)$$

A matriz \mathbf{C} é simplesmente as primeiras l linhas de \mathbf{O}_i .

Obtidos os resultados da identificação (as matrizes no espaço de estado do sistema), a determinação das características dinâmicas da estrutura deve ser feita por meio de uma análise modal. O comportamento dinâmico é caracterizado pelos autovalores e autovetores da matriz \mathbf{A} e através de sua passagem para o tempo contínuo, como ilustra a Eq. (13):

$$\mathbf{A} = \mathbf{O} \mathbf{E} \mathbf{O}^{-1}, \quad \mathbf{E} = \text{diag}(\lambda_q) \in C^{n \times n}, \quad \mathbf{O}_c = \mathbf{O}, \quad \lambda = \frac{\ln(\lambda_q)}{\Delta t} \quad (13)$$

Os autovalores ocorrem em pares complexos conjugados e podem ser escritos em função das frequências naturais e das razões de amortecimento, conforme Eq. (14):

$$\lambda_{c_q}, \lambda_{c_q}^* = -\xi_q \omega_q \pm j \omega_q \sqrt{1 - \xi_q^2} \quad (14)$$

sendo ξ_q a razão de amortecimento do modo q e ω_q a frequência circular referente ao modo q . As formas modais dadas nos pontos de posicionamento dos sensores \mathbf{O}_q são as colunas de $\mathbf{O} \in C^{l \times n}$. Esta matriz é definida como as partes observadas dos autovetores do sistema \mathbf{O} e são obtidas na forma da Eq. (15):

$$\mathbf{O} = \mathbf{C} \mathbf{O} \quad (15)$$

Dessa forma, os parâmetros modais ω_q , ξ_q e $\ddot{\mathbf{O}}_q$ são obtidos a partir das matrizes do sistema identificadas, \mathbf{A} e \mathbf{C} . Existem algumas variantes desse método (Van Overschee e de Moor, 1996), diferindo na multiplicação de uma função de peso na matriz de projeção \mathbf{P}_i^{ref} , antes da decomposição em valores singulares, determinando a base no espaço de estado na qual o modelo será identificado, como mostra a Eq. (16):

$$\mathbf{W}_1 \mathbf{P}_i^{ref} \mathbf{W}_2 = \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1 \mathbf{V}_1^T \quad (16)$$

Podem-se destacar três versões dos métodos de identificação estocástica de subespaço: componente principal ou *principal component* (PC), componente principal não-ponderado, ou *unweighted principal component* (UPC) e algoritmo de variação canônica, ou *canonical variate algorithm* (CVA). A Tabela 1 mostra as funções de peso destas variantes, sendo \mathbf{I} a matriz identidade.

Tabela 1: Funções de peso

	\mathbf{W}_1	\mathbf{W}_2
PC	\mathbf{I}	$\mathbf{Y}_p^{ref} \left[\mathbf{Y}_p^{ref} \mathbf{Y}_p^{refT} \right]^{1/2} \mathbf{Y}_p^{ref}$
UPC	\mathbf{I}	\mathbf{I}
CVA	$\left[\mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_f^T \right]^{1/2}$	\mathbf{I}

3 Aplicação: torres metálicas de linha de transmissão

Para analisar o comportamento do método descrito, ensaios experimentais são simulados numericamente em duas torres metálicas reais de linhas de transmissão. A primeira delas é uma torre denominada tronco-piramidal, em que as características dinâmicas são avaliadas pela simulação de um ensaio de vibração livre. O segundo exemplo é uma torre colapsada no Japão durante um tufão em 1991, apresentada por Murotsu, Okada e Shao (1994). Neste caso as propriedades modais são obtidas a partir da resposta da estrutura para dois tipos de excitação: um carregamento de impacto e a uma excitação aleatória estacionária.

Exemplo 3.1: Torre SY

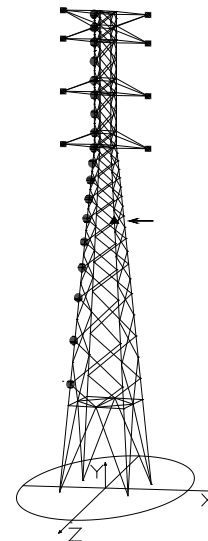


Figura 1: Torre SY

A estrutura em análise é uma torre denominada “SY”, do tipo autoportante, circuito duplo de 138kV, altura total de 33,4 m e abertura na base de 5 m (Fig. 1). A simulação numérica é realizada pela integração numérica direta das equações do movimento, de forma explícita, usando diferenças finitas centrais, numa rotina escrita em linguagem Fortran.

Aplica-se uma carga impulsiva, como mostra a Figura 2(a), no nó com uma seta (Fig. 1), tendo sido este o ponto escolhido para aumentar a energia de deformação de outros modos além do fundamental. O coeficiente de amortecimento proporcional à massa é $c_m = 0,45$, e o passo de integração considerado é $6,25 \times 10^{-6}$ s. A resposta foi calculada durante os 5 s posteriores ao impacto. O histórico de deslocamentos do nó no topo da torre é apresentado na Figura 2(b).

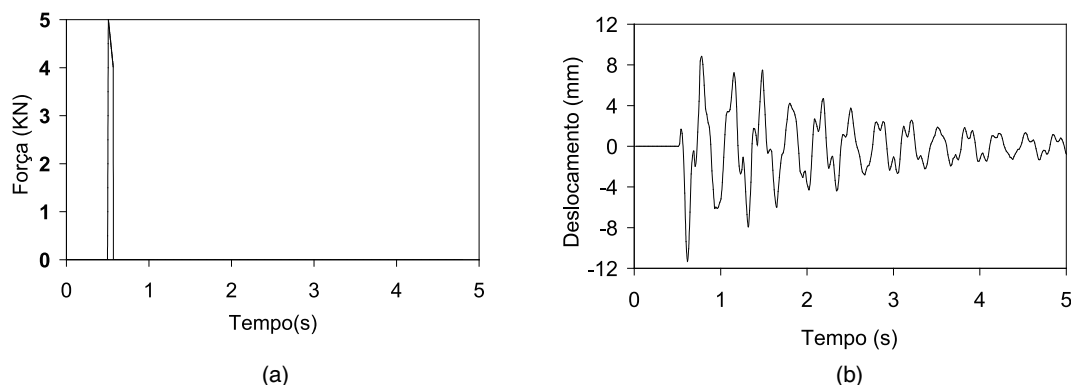


Figura 2: (a) Função de excitação; (b) Resposta do nó no topo na direção z

Apesar de ser aplicada uma excitação de impacto, contrariando uma premissa do método (de que a entrada é modelada como um ruído branco estacionário), esta não introduz pólos adicionais nos dados, que poderiam ser erroneamente identificados como sendo do sistema (Peeters, 1999). Isso se deve ao fato de que esta excitação apresenta um espectro de potência que engloba todas as frequências dos modos mais baixos da torre em estudo.

Somente as respostas dos nós marcados com círculos e quadrados pretos foram consideradas para a identificação feita através do primeiro algoritmo do método descrito, com a consideração das três variantes. Os nós marcados com o círculo representam o posicionamento de sensores nas direções x e z , enquanto os marcados com o quadrado representam apenas sensores posicionados para medir o deslocamento na direção z . Três situações diferentes de aplicação do carregamento ilustrado na Figura 2(a) são estudadas: (i) Primeiro, com o carregamento aplicado somente na direção z ; (ii) após, somente na direção x ; (iii) finalmente, aplicado simultaneamente nas duas direções.

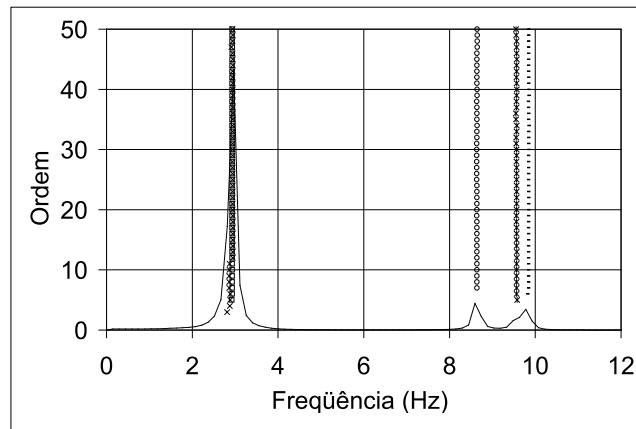


Figura 3: Diagrama de estabilização (PC)

Todos os sensores foram selecionados como de referência, pois o esforço computacional é mínimo. Para a seleção dos pólos estáveis foram utilizados diagramas de estabilização (Fig. 3). Neste diagrama (Peeters, 1999) se comparam os pólos estimados para certa ordem do modelo, com o pólo de ordem inferior. Se o erro relativo à frequência, amortecimento e formas modais não for superior a um limite preestabelecido (1%, 5% e 2%, respectivamente), considera-se o pólo estável e, portanto, correspondente a um modo do sistema identificado.

A Tabela 2 mostra os valores teóricos, obtidos com o programa comercial Ansys, e as frequências e amortecimentos identificados.

Tabela 2: Comparação dos resultados

Modos		1ª Flexão em x	1ª Flexão em z	1ª Torção	2ª Flexão em z	2ª Flexão em x	
Análise Teórica	$f(Hz)$	2,955	2,968	8,959	9,795	9,998	
	ξ	0,0269	0,0268	0,0088	0,0081	0,0080	
SSI - Algoritmo 1	PC	$\bar{f}(Hz)$	2,9308 (0,166%)	2,9400 (0,173%)	8,6388 (0,032%)	9,5621 (0,044%)	9,8185 (0,036%)
		$\bar{\xi}$	0,0264 (3,078%)	0,0259 (4,516%)	0,0092 (3,592%)	0,0083 (3,623%)	0,0083 (4,612%)
	CVA	$\bar{f}(Hz)$	2,9286 (0,129%)	2,9425 (0,181%)	8,6301 (0,041%)	9,5642 (0,181%)	9,8057 (0,088%)
		$\bar{\xi}$	0,0252 (3,311%)	0,0271 (5,379%)	0,0104 (12,383%)	0,0092 (23,053%)	0,0095 (14,177%)
	UPC	$\bar{f}(Hz)$	2,9531 (0,793%)	2,9557 (1,996%)	8,6097 (0,216%)	9,5620 (0,342%)	9,7805 (0,239%)
		$\bar{\xi}$	0,0213 (18,019%)	0,0281 (26,458%)	0,0078 (20,482%)	0,0073 (33,201%)	0,0071 (21,600%)

Os valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação dos valores identificados. Como o procedimento de cálculo adotado para resolver o problema dinâmico escrito em Fortran é diferente do utilizado pelo programa Ansys, poder-se-ia esperar que pequenas variações nos valores das freqüências modais ocorressem. Para o primeiro e o segundo caso de carga, em que a estrutura foi excitada somente numa direção, apenas os modos de flexão que puderam ser identificados são os correspondentes a esta direção. Para o terceiro caso todos os modos puderam ser identificados eficazmente, porém as formas modais apresentaram-se ligeiramente melhores para as duas primeiras situações de carregamento.

Todas as variantes apresentaram muito bons resultados, entretanto a variante PC destacou-se por identificar modos mais próximos dos teóricos e com menor variação dos resultados tanto para a identificação das freqüências como para o amortecimento e formas modais. As formas modais identificadas também se apresentaram muito semelhantes aos resultados fornecidos no programa Ansys, sempre com valores do índice MAC (Fadel Miguel et al., 2006) praticamente iguais a 1,0.

Exemplo 3.2: Torre Colapsada no Japão

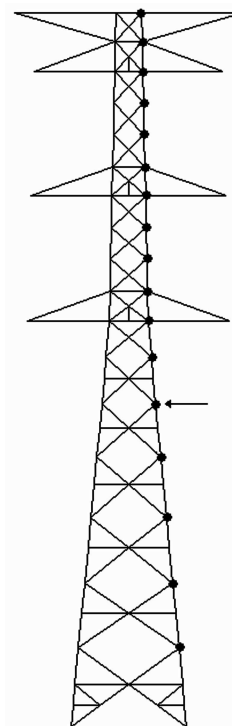


Figura 4: Torre colapsada no Japão

O segundo exemplo é uma torre colapsada no Japão durante um tufão em 1991, analisada por Miguel, Curadelli e Riera (2004) e Fadel Miguel et al. (2006). As simulações numéricas dos ensaios dinâmicos são realizadas via método dos elementos finitos em uma rotina escrita em linguagem MatLab.

A estrutura em análise possui 82m de altura, 80 nós e 163 barras (Fig. 4), sendo analisada utilizando-se elementos de treliça plana. A matriz de amortecimento é considerada proporcional à massa dada por uma constante $c_m = 0,45$, e o passo de integração é igual a 5×10^{-4} s. As propriedades físicas e geométricas podem ser encontradas em Murotsu, Okada e Shao (1994).

Dois excitações são analisadas: impulsiva e aleatória. Esta condição é representada pela aplicação de 76 sinais não correlacionados tipo ruído branco, com média zero e desvio-padrão igual a um, em todos os graus de liberdade da estrutura. A carga de impacto é aplicada no nó marcado com um círculo e uma seta (Fig. 4). Os sinais de excitação são mostrados na Figura 5. Para uma visualização mais clara a excitação aleatória é parcialmente mostrada.

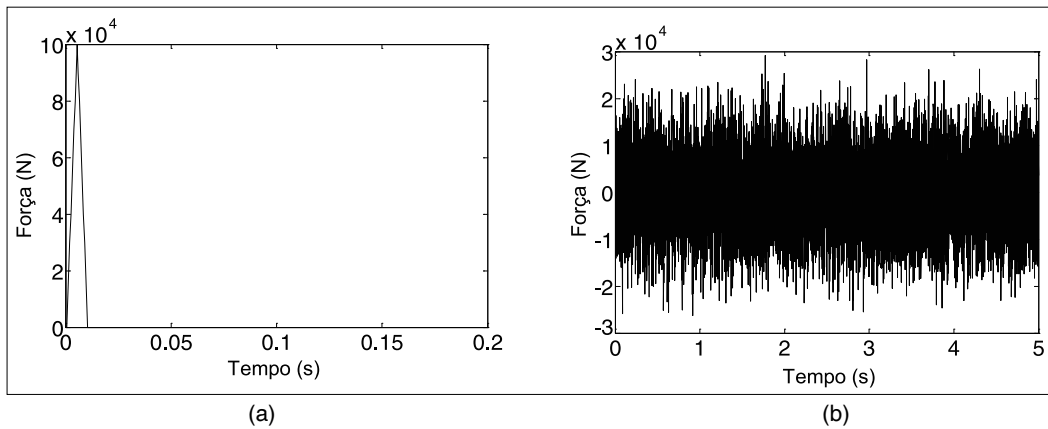


Figura 5: (a) Excitação impulsiva; (b) Parte da excitação aleatória

A magnitude das excitações foi determinada visando fornecer respostas em termos de deslocamentos similares a condições reais de operação. O tempo de análise para a resposta ao impacto é 5 s e para a excitação aleatória é 200 s. A fim de representar melhor as condições de um ensaio experimental, somente as respostas dos nós marcados com círculos são consideradas para a identificação. Além disso, como são usualmente utilizados acelerômetros como instrumentos de medição, para este exemplo as respostas foram tomadas em termos de acelerações. As respostas em acelerações do nó mais alto marcado com o círculo para ambas as situações são apresentadas na Figura 6.

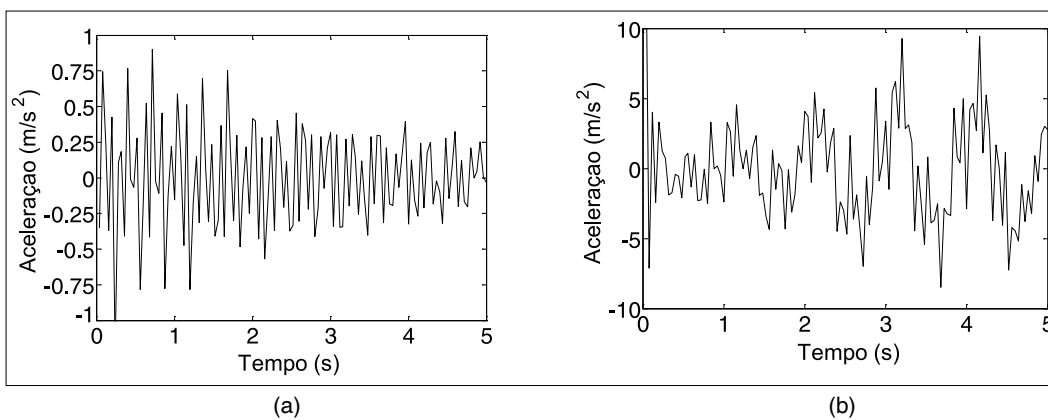


Figura 6: (a) Resposta impulsiva; (b) Parte da resposta aleatória

Os dois algoritmos e as três variantes descritas do método são aplicados. Todos os sensores foram escolhidos como sendo de referência, pois o problema não exige um esforço computacional elevado. Para a seleção dos pólos estáveis diagramas de estabilização diagramas de estabilização foram construídos.

A Tabela 3 mostra uma comparação entre os valores obtidos pela solução do problema de autovalores na rotina em MatLab e os valores de frequência e amortecimento encontrados pela identificação para o carregamento impulsivo.

Tabela 3: Comparação dos resultados: excitação impulsiva

Modos			1ª Flexão	2ª Flexão	3ª Flexão	1º Axial	4ª Flexão	5ª Flexão	
Análise teórica	$f(Hz)$		0,9872	3,1223	5,7880	8,8430	9,3292	11,422	
	ξ		0,0362	0,0115	0,0062	0,0041	0,0038	0,0031	
Excitação Impulsiva	SSI - Algoritmo 1	PC	$\bar{f}(Hz)$	0,9869 (0,07%)	3,1223 (0,01%)	5,7863 (0,04%)	8,8425 (0,01%)	9,3284 (0,01%)	11,422 (0,01%)
			$\bar{\xi}$	0,0361 (1,87%)	0,0115 (0,52%)	0,0062 (1,70%)	0,0041 (2,03%)	0,0038 (1,27%)	0,0031 (1,34%)
		CVA	$\bar{f}(Hz)$	0,9866 (0,35%)	3,1230 (0,12%)	5,7858 (0,05%)	8,8394 (0,06%)	9,3288 (0,01%)	11,422 (0,01%)
			$\bar{\xi}$	0,0363 (1,86%)	0,0115 (0,95%)	0,0062 (1,79%)	0,0041 (3,78%)	0,0038 (0,79%)	0,0031 (0,99%)
		UPC	$\bar{f}(Hz)$	0,9859 (0,11%)	3,1222 (0,03%)	5,7876 (0,01%)	8,8405 (0,07%)	9,3284 (0,03%)	11,422 (0,01%)
			$\bar{\xi}$	0,0359 (1,89%)	0,0115 (2,12%)	0,0062 (1,12%)	0,0041 (5,76%)	0,0038 (0,09%)	0,0031 (1,58%)
	SSI - Algoritmo 2	PC	$\bar{f}(Hz)$	0,9868 (0,02%)	3,1225 (0,02%)	5,7862 (0,04%)	8,8411 (0,02%)	9,3290 (0,05%)	11,423 (0,01%)
			$\bar{\xi}$	0,0364 (1,21%)	0,0115 (1,18%)	0,0062 (2,14%)	0,0042 (2,43%)	0,0038 (1,73%)	0,0031 (2,68%)
		CVA	$\bar{f}(Hz)$	0,9869 (0,07%)	3,1222 (0,14%)	5,7845 (0,09%)	8,8413 (0,03%)	9,3286 (0,01%)	11,422 (0,02%)
			$\bar{\xi}$	0,0357 (3,05%)	0,0115 (1,14%)	0,0062 (4,91%)	0,0041 (2,17%)	0,0039 (2,09%)	0,0031 (2,42%)
		UPC	$\bar{f}(Hz)$	0,9860 (0,11%)	3,1221 (0,03%)	5,7876 (0,01%)	8,8421 (0,01%)	9,3284 (0,03%)	11,422 (0,01%)
			$\bar{\xi}$	0,0361 (2,37%)	0,0115 (1,49%)	0,0062 (1,12%)	0,0040 (2,38%)	0,0038 (1,70%)	0,0031 (1,59%)

Os resultados obtidos mostram uma grande similaridade. De forma geral, os dois algoritmos e as duas variantes apresentaram excelente concordância entre eles e em relação aos valores teóricos da análise via elementos finitos. Cabe salientar que os valores dos coeficientes de variação para as frequências identificadas foram inferiores aos do amortecimento, como já era esperado. A Tabela 4 mostra os valores teóricos dados

pela rotina em MatLab e os valores de frequência e amortecimento obtidos para o caso de excitação aleatória.

Tabela 4: Comparação dos resultados: excitação aleatória

Modos		1ª Flexão	2ª Flexão	3ª Flexão	1º Axial	4ª Flexão	5ª Flexão			
		$f(Hz)$	0,9872	3,1223	5,7880	8,8430	9,3292	11,422		
Excitação Aleatória	Análise Teórica	ξ	0,0362	0,0115	0,0062	0,0041	0,0038	0,0031		
		$\bar{f}(Hz)$	0,9860 (0,05%)	3,1169 (0,07%)	5,7794 (0,02%)	8,8342 (0,03%)	9,3192 (0,14%)	11,426 (0,05%)		
	SSI - Algoritmo 1	PC	$\bar{\xi}$	0,0317 (1,41%)	0,0168 (2,71%)	0,0044 (8,58%)	0,0038 (5,23%)	0,0038 (6,22%)	0,0028 (7,18%)	
			$\bar{f}(Hz)$	0,9885 (0,07%)	3,1187 (0,07%)	5,7778 (0,02%)	8,8336 (0,06%)	9,3302 (0,03%)	11,425 (0,02%)	
		CVA	$\bar{\xi}$	0,0316 (3,19%)	0,0179 (2,27%)	0,0041 (2,12%)	0,0051 (5,72%)	0,0050 (5,86%)	0,0029 (3,45%)	
			$\bar{f}(Hz)$	0,9907 (0,05%)	3,1170 (0,13%)	5,7789 (0,03%)	8,8428 (0,03%)	9,3338 (0,18%)	11,430 (0,11%)	
		UPC	$\bar{\xi}$	0,0301 (1,49%)	0,0166 (4,39%)	0,0039 (6,30%)	0,0037 (4,92%)	0,0035 (4,41%)	0,0026 (7,07%)	
			$\bar{f}(Hz)$	0,9807 (0,02%)	3,1140 (0,04%)	5,7774 (0,02%)	8,8322 (0,05%)	9,3259 (0,05%)	11,430 (0,02%)	
		SSI - Algoritmo 2	PC	$\bar{\xi}$	0,0346 (0,91%)	0,0190 (1,85%)	0,0042 (4,41%)	0,0033 (8,10%)	0,0051 (5,90%)	0,0034 (3,49%)
				$\bar{f}(Hz)$	0,9854 (0,04%)	3,1164 (0,02%)	5,7781 (0,02%)	8,8249 (0,05%)	9,3315 (0,01%)	11,423 (0,02%)
	CVA		$\bar{\xi}$	0,0357 (2,69%)	0,0201 (0,89%)	0,0046 (1,64%)	0,0029 (6,13%)	0,0047 (3,32%)	0,0034 (1,90%)	
			$\bar{f}(Hz)$	0,9907 (0,05%)	3,1177 (0,12%)	5,7790 (0,03%)	8,8426 (0,03%)	9,3395 (0,23%)	11,4299 (0,12%)	
	UPC		$\bar{\xi}$	0,0301 (1,49%)	0,0166 (3,99%)	0,0039 (5,67%)	0,0036 (4,19%)	0,0049 (10,3%)	0,0025 (5,07%)	

Também para este caso, os resultados identificados para a excitação aleatória foram muito próximos para os dois algoritmos e para as três variantes e também daqueles obtidos com a análise teórica via elementos finitos. Os valores de razão de amortecimento identificados apresentaram uma sutil diferença daqueles obtidos com a identificação para a excitação impulsiva e os esperados teoricamente.

Para a avaliação da correlação entre as formas modais identificadas e os valores obtidos teoricamente, utiliza-se o critério da concordância modal ou índice MAC. De forma geral, esse valor mostra-se em quase todas as situações igual a 1,0, ou seja, os modos apresentam correlação plena. Apenas nas formas modais identificadas no modo axial para a excitação aleatória este índice apresentou-se ligeiramente inferior, com um valor médio entre os diferentes algoritmos e variantes igual a 0,78. Este fato pode ser explicado pela não-utilização de respostas na direção vertical durante o processo de identificação, direção em que este modo possui os maiores deslocamentos.

4. Conclusões

Este trabalho apresentou a utilização de dois algoritmos e três variantes do Método de Identificação Estocástica de Subespaço (SSI) para a determinação dos parâmetros modais de duas torres metálicas de LT reais, a partir do conhecimento de dados somente de resposta.

No primeiro exemplo aplicou-se o primeiro algoritmo do método descrito, com a consideração das três variantes a uma torre do tipo "SY" submetida a uma excitação de impacto simulada numericamente. A segunda estrutura analisada é uma torre construída no Japão que colapsou devido a um tufão em 1991. Neste caso, foram simulados dois tipos de excitação com o objetivo de determinar as propriedades modais: excitação de impacto e excitação aleatória. As três versões e os dois algoritmos para as diferentes situações estudadas identificaram as características dinâmicas com uma elevada concordância entre si e aos valores teóricos. Observou-se que, mesmo considerando que a aplicação de uma carga de impacto viola uma premissa da metodologia, a precisão dos resultados obtidos não foi comprometida. Isso é explicado pelo fato de que esta excitação apresenta um espectro de potência que engloba todas as frequências dos modos mais baixos da torre em estudo. Além disso, também pode ser concluído que, dentro da faixa de frequência das torres estudadas, a utilização dos sinais de deslocamentos ou acelerações apresentou a mesma precisão para determinação dos parâmetros modais.

Apesar de o estudo ter sido conduzido por meio de simulações numéricas, acredita-se que a qualidade dos resultados obtidos fornece uma segurança para a aplicação da metodologia em casos reais de ensaios dinâmicos.

Referências

Fadel Miguel, L. F.; Miguel, L. F. F.; Menezes, R. C. R.; Kaminski Jr., J. (2006). Modal parameter identification of a high voltage transmission line tower subjected to ambient excitation. *Proceedings of the 27th Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Belém, Setembro.

Miguel, Letícia F. F.; Curadelli, R. O.; Riera, J. D. (2004). Uso de amortecedores por atrito e metálicos no controle de vibrações induzidas pelo vento em torre metálica. *XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural*, Mendoza, Argentina.

Murotsu, Y.; Okada, H.; Shao, S. (1994). Reliability-based design of transmission line structures under extreme wind loads. In: *Schuëller, Shinozuka, & Yao, eds. Structural Safety & Reliability*, p. 1675-1681.

Peeters, B.; De Roeck, G. (1999). Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 13, n. 6, p. 855-878.

Van Overschee, P.; De Moor, B. (1993). Subspace algorithm for the stochastic identification problem. *Automatica*, v. 29, n. 3, p. 649-660.

Stochastic subspace identification for high voltage transmission line towers

The search to better understand a number of issues linked to the structural analysis previously considered less important, as well as for structural healthy monitoring and design of vibration control systems that have received special attention have provoked an increasing concern in system identification field. Due to practical and economical reasons, it is interesting in transmission line towers the use of natural factors to excite the structure. In this case, the ambient input remains unknown and the system identification algorithms have to deal with output-only measurements. In the present paper, a numerical comparative study among two different stochastic subspace system identification algorithms and three variants of this methodology is carried out. Two different transmission line tower structures are analyzed. The first is a "SY" tower with 33.4m high and the second is a transmission line tower collapsed in Japan during a typhoon in 1991. Impact and ambient loading as input are tested and the results are compared with those expected of the finite element model of the structures.

Key words: System identification. Transmission line towers.

1 Introduction

Accidents of large proportions with transmission line tower structures, as happened in Canada and France at the end of the past decade, suggest that efforts should be done to better understand a number of issues linked to the structural analysis previously considered less important, including: the validity of the dynamic loadings considered as static-equivalent, the structural damping on metallic towers and on cables influence, among others.

In this context, as well as for structural healthy monitoring and design of vibration control systems that have received special attention due to the system acquisition devices development, the system identification field becomes fundamental because it has as objective the solution of the inverse problem, i.e., the identification of a system that describes the relationship between an input and an output. In other words, the system identification goal is the description of an existent structural system by a model through its modal parameters, based on experimentally obtained data.

Inside this context, this paper presents a comparative study between two different algorithms and three variants of the stochastic subspace system identification method (SSI) for the dynamic properties identification of two real transmission line towers. In order to represent an output-only modal analysis, just response data are considered for the identification.

2 Stochastic subspace system identification method (SSI)

The identification method described starts from a discrete-time state-space model given in Eq. (1). The main property of those systems indicates that the output covariances can be considered as Markov parameters of the deterministic linear time-invariant system, constituting the solution to the stochastic identification problem: the output covariance sequence can be estimated from the measurement data; so if the estimated output covariance sequence can be decomposed in a similar way, the state-space matrices are found.

However, due to its formulation the stochastic subspace identification method (SSI) avoids this previous computation of covariances between the outputs. It is replaced by projecting the row space of future outputs into the row space of past outputs. The idea behind this projection, which apply robust numerical techniques such as QR factorization, is retain in the past all the information that is useful to predict the future.

After obtained the system matrices A and C they should be used for a modal analysis of the structure. The dynamic behavior is characterized by their eigenvalues and eigenvectors through its transformation for the continuous time (Eq. 13). In this sense, the modal parameters ω_q , ξ_q and \tilde{O}_q may be obtained. There are some variants of stochastic subspace identification, differing in the multiplication of a weight function in the projection matrix P_i^{ref} , before the singular value decomposition, determining the state-space basis in which the model will be identified (Eq. 16).

3 Application: transmission line towers

In order to analyze the described method, dynamic tests are numerically simulated in two real transmission line towers. The first structure is a "SY" tower with 33.4m high, in which the modal parameters are obtained from free vibration conditions. The second is a transmission line tower collapsed in Japan during a typhoon in 1991, analyzed by Fadel Miguel et al. (2006). In this case, two different typical excitations are analyzed: the impulsive and the ambient excitation. This condition is represented by the application of 76 uncorrelated Gaussian white noise signals, with zero mean and standard deviation equals to one, at all degrees of freedom of the structure.

In a general way, as much the two algorithms as the three variants for both impulsive and stochastic excitation the results present very close among themselves and to the theoretical values. For the mode shapes correlation analysis among the theoretical and identified values is used the modal assurance criterion or MAC index, showing the total correlation among the theoretical and identified mode shapes, for the two algorithms and three variants in almost all scenarios.

4 Conclusions

This paper presented the use of three variants and two algorithms of the stochastic subspace system identification method (SSI) for the modal parameters estimation of two transmission line towers in an output-only system identification procedure. It was verified that for the three variants and two algorithms the results were very accurate for both load cases, which indicate that the methodology can be successfully applied for real dynamic tests.