



ESTUDO DE ESTRATÉGIAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS PARA A INFERÊNCIA DOS PARÂMETROS MODAIS UTILIZANDO A TÉCNICA SSI-DATA

Renato Cancherini Lefone

Carlos Magluta

lefone@ime.eb.br

magluta@coc.ufrj.br

Laboratório de Estruturas e Materiais - PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão,
CEP:21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

Luiz Augusto Cavalcante Moniz de Aragão Filho

moniz@ime.eb.br

Grupo de Identificação Estrutural - PGT/SE-2/IME

Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Praia
Vermelha, CEP:22290-270, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. *O avanço do conhecimento das características dos materiais de construção e o desenvolvimento das técnicas construtivas, aliados ao avanço tecnológico que possibilitou o aumento da capacidade de processamento computacional, possibilitaram a construção de edificações mais altas, mais esbeltas e com vãos mais amplos. Essas características tornaram-se cada vez mais frequentes na engenharia atual, aumentando a suscetibilidade das construções às vibrações. Com isso, a análise experimental dinâmica assume uma importância cada vez maior na engenharia, através da verificação da integridade dos sistemas estruturais. A estimação de parâmetros modais de uma estrutura é essencial para a verificação de sua integridade, podendo ser realizada através de diferentes técnicas, sendo a Data-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA) uma das mais utilizadas. Os parâmetros estimados por essas técnicas são obtidos através de amostragem do sinal de resposta da estrutura às excitações que está sujeita, sendo influenciados pela maneira com*

que as informações amostradas são selecionadas. Este trabalho tem por objetivo estudar estratégias de pré-processamento dos sinais aquisitados a serem empregadas na técnica SSI-DATA, utilizando dados simulados de um sistema estrutural submetido a um carregamento aleatório não correlacionado introduzindo-se ou não ruído. Por fim, discutem-se os resultados encontrados para os parâmetros estimados.

Palavras-chave: *Análise modal, SSI-DATA, Identificação Estrutural*

1 INTRODUÇÃO

A integridade de estruturas de grande porte é um fator de extrema importância, principalmente devido ao avanço tecnológico que possibilitou a construção de elementos mais esbeltos e mais propensos às vibrações. O monitoramento contínuo acompanha o comportamento da estrutura, sendo capaz de detectar danos com antecedência adequada, aumentando assim a confiabilidade e a durabilidade da mesma.

O monitoramento é realizado através da aquisição da resposta da estrutura aos carregamentos que nela atuam, por meio de sinais contínuos no tempo. Esses sinais são estudados através da análise modal, que obtém estimativas dos parâmetros modais, essenciais para a verificação da integridade estrutural.

A literatura de análise modal apresenta diversas técnicas para a obtenção das estimativas dos parâmetros modais, sendo que as aplicações da técnica denominada Stochastic Subspace Identification (SSI) têm se destacado (Aragão Filho, 2008). Esta técnica possui dois tipos de abordagem: Covariance-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV) e Data-Driven Stochastic Subspace Identification (SSI-DATA).

O objetivo deste trabalho é analisar estratégias de pré-processamento dos sinais adquiridos a serem empregadas na técnica SSI-DATA, verificando se podem influenciar de maneira significativa na estimativa dos parâmetros modais de uma estrutura. Para isso, serão utilizados dados simulados de um modelo de elementos finitos de viga plana biapoada, elaborado por Aragão Filho (2008), submetido a um carregamento aleatório não correlacionado com ou sem ruído.

A primeira seção deste artigo expõe uma sucinta introdução a respeito do tema proposto. A segunda seção apresenta, de maneira sumária, a técnica SSI-DATA. A terceira seção apresenta o modelo numérico utilizado e as informações relevantes das simulações realizadas por Aragão Filho (2008). A quarta seção aborda a metodologia utilizada no estudo de estratégia de pré-processamento do sinal adquirido. A quinta seção apresenta os resultados obtidos com a aplicação da metodologia abordada na quarta seção. Na sexta seção, são realizadas as considerações finais acerca dos resultados encontrados para os parâmetros estimados.

2 APRESENTAÇÃO DA TÉCNICA SSI-DATA

A SSI-DATA é uma técnica de identificação no espaço de estados que ganhou impulso com a solução estocástica apresentada por Van Overschee e De Moor (1993). Essa técnica organiza o sinal de resposta em uma matriz de Hankel (matriz simétrica em que os elementos de cada anti-diagonal são iguais), subdividida em duas matrizes: de dados “passados” e dados “futuros”, conforme a Fig. 1.

Um dos parâmetros fundamentais da técnica é o número de linhas i de cada bloco de dados (“passado” e “futuro”) da matriz de Hankel (Aragão Filho, 2008), devendo ser maior que a máxima ordem do sistema a ser identificado (Van Overschee e De Moor, 1996). Desta

forma, o número de colunas j fica igual a $s-2i+1$, onde s são todas as amostras de dados. De Cock *et al.* (2002) sugerem ainda que o número de colunas j não seja menor que $2i-1$.

$$H_{0|2i-1} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{j-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{i-2} & y_{i-1} & \dots & y_{i+j-3} \\ y_{i-1} & y_i & \dots & y_{i+j-1} \\ y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \dots & y_{i+j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \dots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix}_{2i \times j} = \begin{bmatrix} H_{0|j-1} \\ H_{i|2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{passado} \\ H_{futuro} \end{bmatrix}$$

Figura 1. Matriz de Hankel (Aragão Filho, 2008)

Após a formação da matriz de Hankel, realiza-se a estimação da matriz de Estado a partir da matriz de projeção P do espaço-linha formado pelas linhas da matriz de dados “futuros” sobre o espaço-linha formado pelas linhas da matriz de dados “passados”, e da sua decomposição em valores singulares.

A verificação dos valores singulares de maior magnitude da matriz de projeção permite inferir a ordem do sistema. Fazendo-se variar o número de pólos (reduzindo-se o número de linhas da matriz de Hankel), obtém-se o diagrama de estabilização dos pólos e com ele os parâmetros modais.

3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Aragão Filho (2008) elaborou um modelo de elementos finitos de uma viga biapoada, constituído por elementos lineares planos com dois graus de liberdade por nó (deslocamento vertical e rotação). As características físicas da viga estão apresentadas na Tabela 1. Já os parâmetros modais dos três primeiros modos de vibração constam na Fig. 2.

O referido autor realizou uma análise, dos sinais simulados numericamente, que teve por objetivo obter uma relação entre a duração dos sinais e a exatidão das estimativas dos parâmetros modais obtidos através da técnica SSI-DATA. Nessa análise, foram empregadas as respostas dos seguintes graus de liberdade (GL) verticais: primeiro quarto do vão (GL 07), primeiro terço do vão (GL 09) e meio do vão (GL 13).

Inicialmente sem ruído, o sinal de duas horas de duração foi dividido em períodos de 3, 6, 12 e 30 minutos (com e sem sobreposição), nos quais aplicou-se a técnica SSI-DATA. A estimação dos parâmetros modais (frequências naturais e taxas de amortecimento) foi obtida calculando-se a média e o intervalo de confiança entre os parâmetros modais obtidos em cada período de sinal supracitado. O mesmo procedimento foi realizado com a adição de ruído equivalente a 10 % do valor *rms* do sinal de resposta da viga.

Tabela 1. Características físicas da viga bi-apoiada (Aragão Filho, 2008)

Características	Valores
Vão principal	1,470 m
Módulo de elasticidade (E)	$2,05 * 10^5 \text{ MPa}$
Massa específica	$7,85 * 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Área da seção transversal	$6,048 * 10^{-4} \text{ m}^2$
Momento de inércia	$3,175 * 10^{-9} \text{ m}^4$

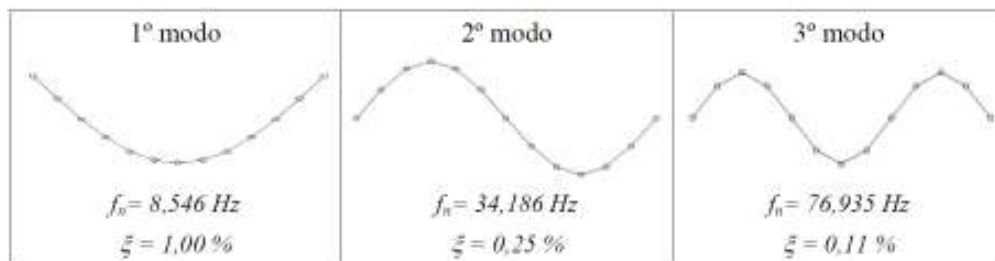


Figura 2. Parâmetros dos três primeiros modos de vibração do modelo da viga bi-apoiada (Aragão Filho, 2008).

A técnica SSI-DATA foi aplicada adotando-se um número de blocos de linha da matriz de dados igual a 10. O diagrama de estabilização foi utilizado com ordem máxima de 24 e aceitação de variabilidades iguais a 2,5 % na frequência natural e 15% na taxa de amortecimento.

Os resultados obtidos ratificaram uma conclusão já esperada no âmbito da análise modal de estruturas em operação (OMA) de que quanto menor for o período disponibilizado do sinal, piores serão as estimativas dos parâmetros modais. Pode-se observar essa conclusão nas Fig. 3 e 4, onde há uma maior ocorrência de erro nas estimativas dos segmentos do sinal de menor período. Com o intuito de trabalhar com segmentos que não sejam muito grandes, mas que também apresentem menos erros em suas estimativas, o presente trabalho irá adotar 10 segmentos de 12 minutos de sinal na análise a ser realizada.

Aragão Filho (2008) observou que a divisão do sinal em 10 períodos de 12 minutos apresentou estimativas das frequências naturais dos três primeiros modos com erro de até 0,5%, sem a presença de ruído. Quando adicionado ruído ao sinal, a mesma faixa de erro também foi encontrada na estimativa das frequências naturais do 1º e 2º modo de vibração, sendo que na estimativa da frequência natural do 3º modo de vibração um período apresentou erro superior a 1,0%, enquanto os 9 restantes apresentaram erro de até 0,5%, de acordo com a Fig. 3.

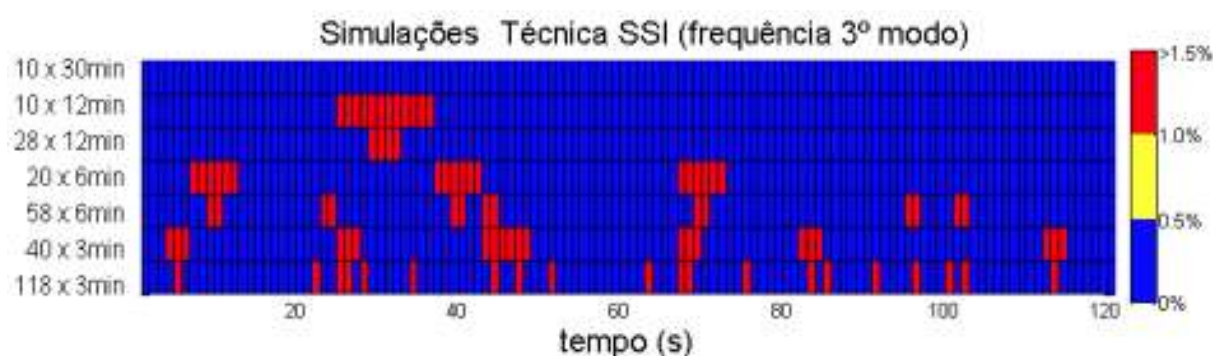


Figura 3. Erro encontrado nas estimativas de frequência do 3º modo de vibração a partir da aplicação da técnica SSI sobre cada segmento do sinal com ruído (Aragão Filho, 2008).

Com relação às estimativas das taxas de amortecimento, a segmentação do sinal (sem ruído) em 10 períodos de 12 minutos apresentou erro de até 10% no 1º e 2º modo, bem como em 9 períodos no 3º modo (um período apresentou desvio de 10 a 20%). Levando-se em consideração a mesma divisão do sinal com ruído, obteve-se também um erro de até 10% nas estimativas dos três modos de vibração em estudo, com exceção de um segmento na obtenção da taxa de amortecimento do 3º modo, que apresentou um desvio superior a 20% (Fig. 4).

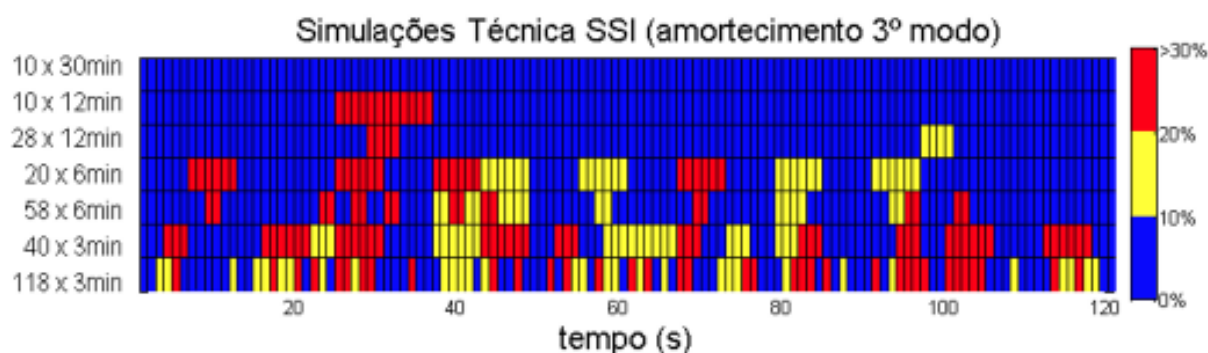


Figura 4. Erro encontrado nas estimativas de amortecimento do 3º modo de vibração a partir da aplicação da técnica SSI sobre cada segmento do sinal com ruído (Aragão Filho, 2008).

A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros modais estimados pela técnica SSI-DATA na análise realizada por Araújo Filho (2008).

Tabela 2. Valores dos parâmetros modais estimados pela técnica SSI-DATA (Aragão Filho, 2008)

Parâmetro	Modo de vibração	Sinal sem ruído	Sinal com ruído
Frequência natural (Hz)	1º modo	8,549 ($\pm 0,019$)	8,549 ($\pm 0,019$)
	2º modo	34,186 ($\pm 0,019$)	34,186 ($\pm 0,019$)
	3º modo	76,935 ($\pm 0,019$)	76,935 ($\pm 0,019$)
Taxa de amortecimento (%)	1º modo	0,989 ($\pm 0,126$)	0,989 ($\pm 0,126$)
	2º modo	0,251 ($\pm 0,036$)	0,251 ($\pm 0,036$)
	3º modo	0,112 ($\pm 0,023$)	0,112 ($\pm 0,023$)

4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho baseia-se em estudar a eficiência de estratégias de pré-processamento dos sinais adquiridos na estimação dos parâmetros modais pela técnica SSI-DATA. Para tanto, adotou-se os mesmos parâmetros da análise da simulação numérica de referência, com a segmentação do sinal da estrutura em 10 períodos de 12 minutos.

Os períodos de 12 minutos utilizados foram janelados sequencialmente. Dessa forma, o primeiro período correspondeu aos primeiros doze minutos de aquisição do sinal e assim sucessivamente, até o décimo período, que correspondeu aos últimos doze minutos.

A proposta do presente trabalho consiste em dividir o sinal em 10 segmentos de 12 minutos tomados a partir dos dez maiores picos positivos existentes na resposta da estrutura ao longo dos 120 minutos de aquisição de dados. Para isso, identificaram-se inicialmente os valores e as posições dos dez maiores picos positivos na resposta de cada grau de liberdade.

Após a identificação dos picos, adotou-se um grau de liberdade como referência (GL_{ref}). O primeiro segmento de 12 minutos foi formado a partir da posição do maior pico positivo do sinal do GL_{ref} , com o mesmo localizando-se no centro do segmento. O tempo de início do segmento foi obtido subtraindo-se seis minutos da posição do maior pico, e o tempo de término somando-se seis minutos à posição do maior pico. Com a definição dos tempos de

início e término do primeiro segmento no GL_{ref} , foi possível obter os primeiros segmentos nos outros dois GL e montar assim a matriz de dados da resposta da estrutura do segmento de 12 minutos em análise. Esse processo se repetiu para os próximos nove maiores picos do GL_{ref} adotado. A Fig. 5 apresenta um exemplo de obtenção de um segmento de 12 minutos de acordo com a metodologia proposta.

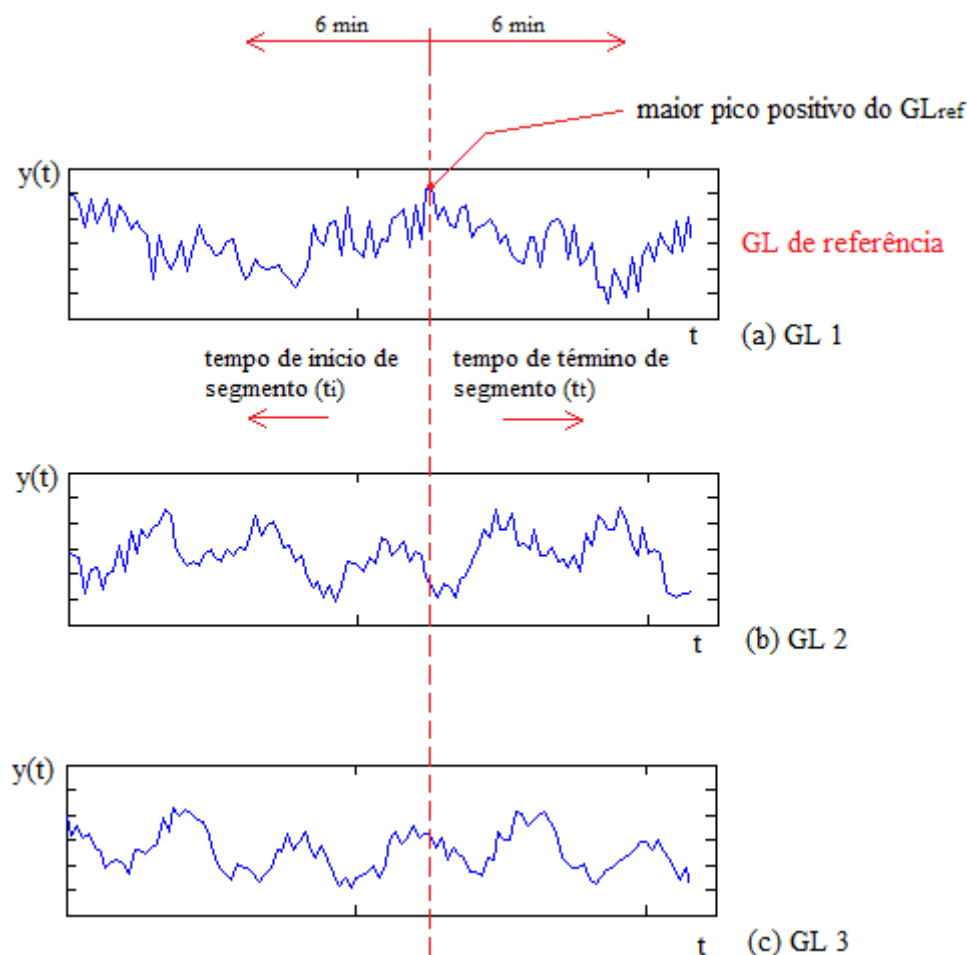


Figura 5. Obtenção de um segmento de 12 minutos do sinal aquisitado.

As etapas descritas para um GL_{ref} , foram repetidas mais duas vezes (uma para cada sinal de GL disponível), com o objetivo de analisar a influência da escolha do GL_{ref} nas estimativas dos parâmetros modais.

O presente estudo também analisou o sinal com e sem ruído, sendo o ruído calculado da mesma maneira que Aragão Filho (2008), através de acréscimo de sequências aleatórias uniformemente distribuídas com amplitudes de 10% do valor *rms* dos sinais de resposta da estrutura.

Os intervalos de confiança das estimativas dos parâmetros modais também foram calculados da mesma maneira que o estudo de referência, considerando que os valores das estimativas calculadas para cada segmento de sinal correspondam a uma distribuição normal com um nível de confiança de 95%.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As estimativas das frequências naturais da estrutura analisada, bem como seus intervalos de confiança, são apresentadas nas Tabelas 3 (sinal sem ruído) e 4 (sinal com ruído). Já as estimativas das taxas de amortecimento e seus intervalos de confiança são apresentados nas Tabelas 5 (sinal sem ruído) e 6 (sinal com ruído).

Analisando inicialmente o sinal sem ruído, observa-se que os valores obtidos para o 1º e o 3º modo de vibração, relativos à frequência natural e à taxa de amortecimento, estão muito próximos dos valores exatos do modelo da viga, bem como das estimativas calculadas por Aragão Filho (2008) apresentadas na Tabela 2. Além disso, os intervalos de confiança desses parâmetros são significativamente menores em relação aos intervalos de confiança do trabalho de referência, com reduções variando de 78,23% a 83,26%, para as frequências naturais, e de 74,96% a 86,21% para as taxas de amortecimento.

A escolha do grau de liberdade de referência influenciou significativamente apenas as estimativas dos parâmetros modais do 2º modo de vibração que, apesar de próximas às estimativas de Aragão Filho (2008), não atenderam aos intervalos de confiança alcançados pelo referido autor quando os GL 07 e 09 foram adotados como GL_{ref}. Contudo, ao adotar-se o GL 13 como grau de liberdade de referência, as estimativas dos parâmetros em estudo, do modo de vibração em questão, não só atenderam ao intervalo de confiança do trabalho de referência como também apresentaram uma redução de 81,16% e de 72,19% dos intervalos de confiança da frequência natural e da taxa de amortecimento, respectivamente. Isso demonstra a necessidade de se realizar, em trabalhos futuros, uma análise de sensibilidade para a escolha do GL_{ref} a ser adotado.

O acréscimo do ruído ao sinal, assim como ocorreu em Aragão Filho (2008) para os tamanhos de sinais utilizados, não apresentou alterações significativas nas estimativas dos parâmetros modais. A escolha do grau de liberdade de referência não influenciou de maneira significativa, no sinal com ruído, as estimativas dos parâmetros modais dos três modos de vibração em estudo.

Tabela 3. Média das estimativas das frequências naturais (Hz) e intervalos de confiança inferidos (sinal sem ruído).

Modo de vibração	Valor exato (Aragão Filho,2008)	GL _{ref} = GL 07	GL _{ref} = GL 09	GL _{ref} = GL 13
1º modo	8,546	8,545 (±0,0038)	8,546 (±0,0038)	8,545 (±0,0041)
2º modo	34,186	34,224 (±0,0755)	34,224 (±0,0755)	34,187 (±0,0036)
3º modo	76,935	76,936 (±0,0036)	76,937 (±0,0032)	76,937 (±0,0040)

Tabela 4. Média das estimativas das frequências naturais (Hz) e intervalos de confiança inferidos (sinal com ruído).

Modo de vibração	Valor exato (Aragão Filho,2008)	GL _{ref} = GL 07	GL _{ref} = GL 09	GL _{ref} = GL 13
1º modo	8,546	8,546 (±0,0031)	8,546 (±0,0031)	8,546 (±0,0031)
2º modo	34,186	34,186 (±0,0033)	34,186 (±0,0031)	34,186 (±0,0037)
3º modo	76,935	76,936 (±0,0042)	76,936 (±0,0038)	76,937 (±0,0040)

Tabela 5. Média das estimativas das taxas de amortecimento (%) e intervalos de confiança inferidos (sinal sem ruído).

Modo de vibração	Valor exato (Aragão Filho, 2008)	GL _{ref} = GL 07	GL _{ref} = GL 09	GL _{ref} = GL 13
1º modo	1,00	0,960 (±0,026)	0,971 (±0,032)	0,980 (±0,026)
2º modo	0,25	1,607 (±2,664)	1,608 (±2,664)	0,250 (±0,010)
3º modo	0,11	0,116 (±0,003)	0,116 (±0,003)	0,115 (±0,003)

Tabela 6. Média das estimativas das taxas de amortecimento (%) e intervalos de confiança inferidos (sinal com ruído).

Modo de vibração	Valor exato (Aragão Filho, 2008)	GL _{ref} = GL 07	GL _{ref} = GL 09	GL _{ref} = GL 13
1º modo	1,00	0,963 (±0,025)	0,960 (±0,029)	0,968 (±0,021)
2º modo	0,25	0,254 (±0,007)	0,253 (±0,007)	0,254 (±0,008)
3º modo	0,11	0,116 (±0,003)	0,114 (±0,003)	0,115 (±0,003)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada proporcionou uma estimativa dos parâmetros modais mais próxima do valor exato, com um intervalo de confiança significativamente menor do que o obtido em Aragão Filho (2008), demonstrando ser a estratégia proposta uma ferramenta a ser considerada na aplicação da técnica SSI-DATA.

REFERÊNCIAS

- Aragão Filho, L. A. C. M., 2008. *Identificação de Estruturas em Operação Através de Análise Modal Híbrida*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Brasil.
- De Cock, K., Peeters, B., Vecchio, A., Van Der Auweraer, H., , & De Moor, B., 2002. Subspace system identification for mechanical engineering. In *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Engineering*, Leuven.
- Van Overschee, P., De Moor, B., 1993. Subspace algorithms for the stochastic identification problem. *Automatica*, vol. 29, pp. 649–660.
- Van Overschee, P., 1995. *Subspace Identification: Theory, Implementation, Application*. PhD thesis, University of Leuven/Leuven.
- Van Overschee, P., De Moor, B., 1996. *Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications*. Kluwer Academic Publishers.