

5

Identificação de parâmetros modais: Análise de resultados

5.1

Introdução

Neste capítulo, apresentasse uma análise da robustez, na presença de ruído, dos métodos para identificação de parâmetros modais de sistemas mecânicos no domínio do tempo descritos no capítulo 4. Outro complicador no processo de identificação que será explorado é o baixo amortecimento. Assim, o objetivo do estudo é comparar a eficácia dos métodos para identificar bem os parâmetros modais de um sistema MIMO (estrutura Mini-Mast), com alguns dos modos do sistema muito próximos à frequências quase idênticas, na presença de níveis de ruídos baixos e altos. Se estuda também se dita habilidade é mantida no caso de variar no sistema o fator de amortecimento, estudando-se para porcentagens de amortecimento pequeno e grande a vários níveis de ruído.

5.2

Sistema mecânico estudado

Para o exemplo numérico foi simulada a estrutura conhecida como Mini-Mast (ver Fig. 5.1) usando o modelo reduzido em espaço de estados de dito sistema. A Mini-Mast é uma viga estrutural de 20 m de comprimento fabricado pela NASA Langley Research Center para pesquisa em dinâmica estrutural e controle ativo de vibrações. A estrutura é desdobrada verticalmente e engastada na sua base em uma fundação rígida. O sistema tem dois atuadores (torque wheels) e dois sensores (Kaman sensors).

O modelo matemático tem 5 modos (10 estados) e os parâmetros modais são mostrados na Tab. 5.1; os primeiros dois modos são muito próximos à frequências naturais quase idênticas, e são os primeiros modos de flexão nos eixos x e y ; o terceiro modo é de torção no eixo z ; e os dois últimos modos, também muito próximos à frequências naturais quase idênticas, são

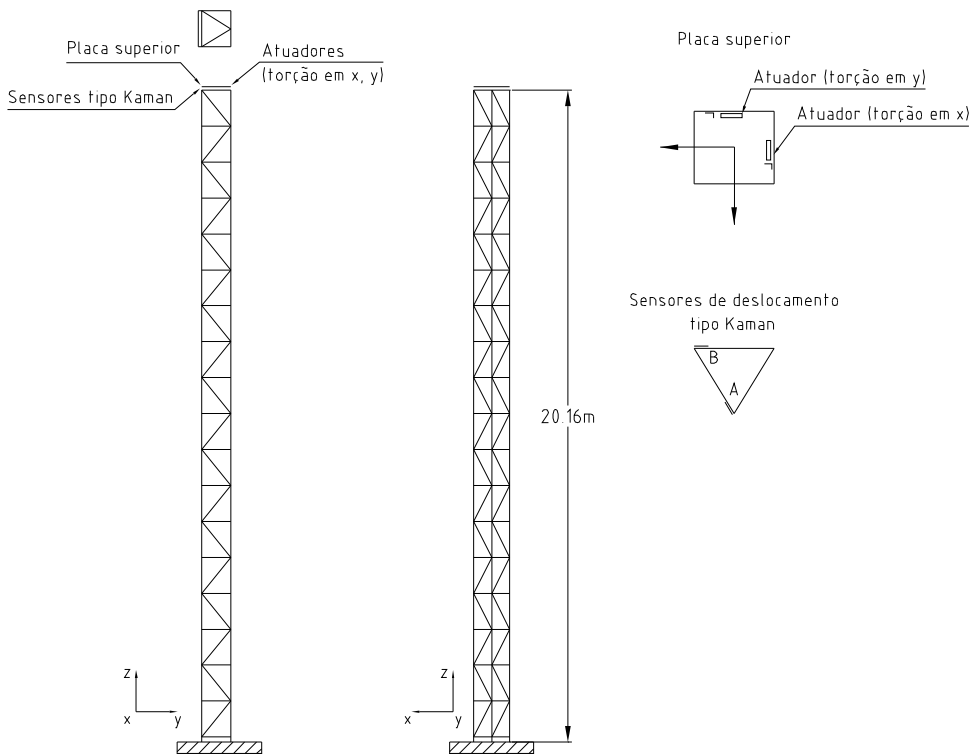


Figura 5.1: Estrutura Mini-Mast.

os segundos modos de flexão; isto faz com que o modelo seja suficientemente complexo para testar os métodos de identificação empregados. As matrizes do sistema em espaço de estados são mostradas no Anexo A.

modo N°	ω (Hz)	ζ (%)
1	0.8010	1.8
2	0.8016	1.8
3	4.3644	1.2
4	6.1041	1.0
5	6.1568	1.0

Tabela 5.1: Parâmetros modais do modelo da estrutura Mini-Mast: frequências naturais (ω) e fatores de amortecimento modal (ζ).

A entrada, ou excitação empregada na simulação, é um ruído branco com média zero e com desvio padrão 10. No estudo são considerados 3 níveis de ruído tanto na entrada como na saída, de 1%, 5% e 10%, para cada um dos casos de estudo do sistema com pouco amortecimento ($\zeta < 1\%$), amortecimento médio ($1\% < \zeta < 4\%$) e grande amortecimento ($\zeta > 4\%$). O processo de ruído é simulado como $f\%$ do ruído branco usado como signal de excitação e o ruído nas medições como $f\%$ do máximo valor das respostas

obtidas nas saídas, ambos casos como fração percentual do desvio padrão, sendo \mathbf{f} o nível de ruído desejado.

Como magnitude de comparação da exactitude dos métodos na identificação, foram considerados os máximos valores singulares da função de transferência do sistema identificado. Só as frequências identificadas dentro da faixa até 10 Hz são consideradas. O número de amostras é sempre $l=1800$, com intervalo de tempo entre cada amostra de 0.03 s. Para a comparação, a dimensão da matriz a ser descomposta em valores singulares, ou seja, a dimensão da matriz de Hankel no ERA e OKID/ERA, e a dimensão da matriz Hankel de correlação em blocos no ERA/DC e OKID/ERA/DC, é mantida a mesma num mesmo caso de estudo, como sugerido por Lew [27], para manter iguais os tempos de execução dos algoritmos.

O critério de seleção dos modos considerados relevantes foi feito usando o MAC descrito no Capítulo 3.

Para observar a consistência dos algoritmos, foi calculado a média dos resultados de 20 execuções dos algoritmos em cada caso analisado.

5.3

Sistema com amortecimento médio

As porcentagens de amortecimento do sistema original estão na faixa $1\% < \zeta < 4\%$.

No ERA, foram usados $k=250$ ($k+1$ parâmetros de Markov do sistema calculados).

No ERA/DC, foram usados $k=325$ ($k+1$ parâmetros de Markov do sistema calculados) incrementando pouco o tempo computacional, mas não incrementa a dimensão da matriz $\mathcal{H}(0)$.

No OKID/ERA, foram usados $p=50$ ($p+1$ parâmetros de Markov do observador calculados) e $k=250$ ($k+1$ parâmetros de Markov do sistema calculados).

No OKID/ERA/DC, foram usados $p=50$ ($p+1$ parâmetros de Markov do observador calculados) e $k=325$ ($k+1$ parâmetros de Markov do sistema calculados).

5.3.1

CASO: $1\% < \zeta < 4\%$ com baixos níveis de ruído (1%)

Os resultados da identificação com baixos níveis de ruído se apresentam nas Tabelas 5.2 e 5.3.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8010	0.8016	4.3644	6.1041	6.1568
ERA	0.7917	0.8034	4.3655	6.1034	6.1556
ERA/DC	0.7929	0.8075	4.3587	6.1033	6.1600
OKID/ERA	0.8009	0.8016	4.3659	6.1063	6.1584
OKID/ERA/DC	0.8009	0.8016	4.3659	6.1063	6.1584

Tabela 5.2: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com amortecimento médio: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	1.80	1.80	1.20	1.00	1.00
ERA	1.45	2.96	1.19	0.91	1.00
ERA/DC	1.47	2.04	1.20	1.02	1.01
OKID/ERA	1.81	1.79	1.29	1.13	1.04
OKID/ERA/DC	1.81	1.79	1.28	1.13	1.04

Tabela 5.3: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com amortecimento médio: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

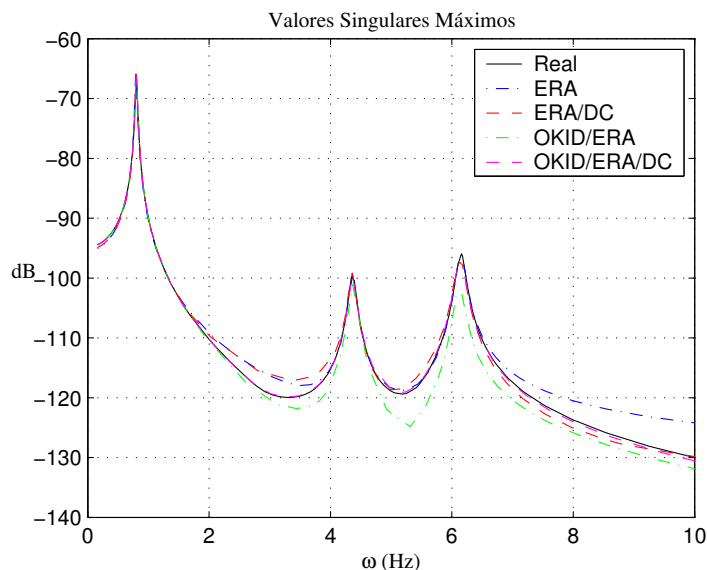


Figura 5.2: Mini-Mast $1\% < \zeta < 4\%$ – comparação dos métodos com 1% de ruído.

Para sistemas com amortecimento médio e com 1% de ruído, todos os modos são bastante bem identificados pelas quatro variantes como se

observa na comparação dos máximos valores singulares das F.T. (Fig. 5.2). Para os fatores de amortecimento (Tab. 5.3) encontra-se uma ligeira melhor aproximação na identificação com OKID/ERA e OKID/ERA/DC especialmente nos amortecimentos associados aos modos 1 e 2.

5.3.2

CASO: $1\% < \zeta < 4\%$ com medianos níveis de ruído (5%)

Os resultados da identificação para níveis de ruído de 5% se apresentam nas Tabelas 5.4 e 5.5.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8010	0.8016	4.3644	6.1041	6.1568
ERA	0.8011	0.8093	4.3600	6.0988	6.1532
ERA/DC	0.7989	0.8085	4.3649	6.1168	6.1383
OKID/ERA	0.8002	0.8014	4.3841	6.1156	6.1774
OKID/ERA/DC	0.8005	0.8016	4.3774	6.1063	6.1733

Tabela 5.4: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com amortecimento médio: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	1.80	1.80	1.20	1.00	1.00
ERA	2.43	1.18	1.14	1.02	1.01
ERA/DC	1.18	1.50	1.08	1.02	1.17
OKID/ERA	1.88	1.81	2.94	2.02	2.06
OKID/ERA/DC	1.87	1.83	3.14	1.99	2.12

Tabela 5.5: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com amortecimento médio: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Para níveis de ruído de 5%, as frequências naturais ainda são bem identificadas por todos os métodos como se observa nos resultados obtidos.

Já nos fatores de amortecimento identificados encontra-se erros com o ERA entre 35% associado ao modo 1 e 1% associado ao modo 5. Com o ERA/DC os maiores erros são 34% associado ao modo 1 e 17% associado ao modo 2. Por outro lado com o OKID/ERA e OKID/ERA/DC os erros são 4.4% aproximadamente para os ζ_1 e ζ_2 associados aos modos 1 e 2, mas para os modos 3, 4 e 5 os erros são 110% aproximadamente.

Assim, os fatores de amortecimento modais associados aos modos 1 e 2, são melhor identificados pelos OKID/ERA e OKID/ERA/DC, mas no caso dos fatores de amortecimento modais associados aos modos 3, 4 e 5, são melhor identificados pelos ERA e ERA/DC. Isto acontece porque o número de parâmetros de Markov usados no ERA ($k=250$) e no ERA/DC ($k=325$) é suficiente para garantir o decaimento, mas no caso dos métodos usando OKID, o decaimento é acelerado e o número de parâmetros de Markov empregados é maior dos necessários, incluindo dados contaminantes após do completo decaimento. A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.3.

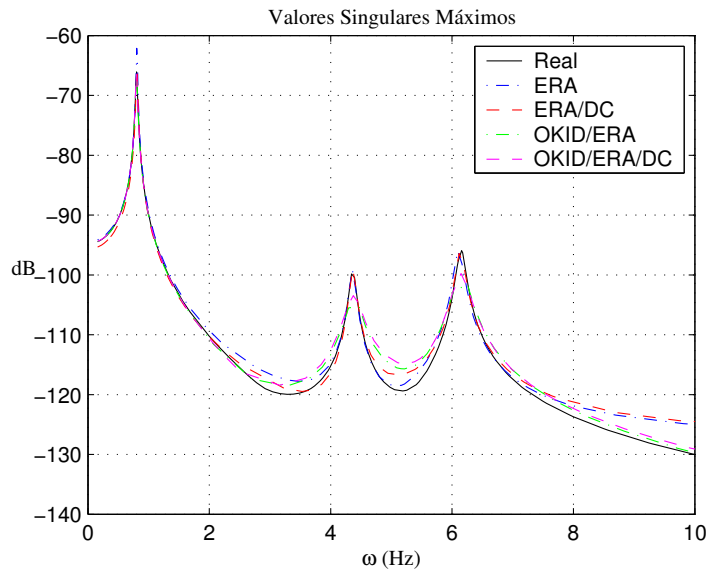


Figura 5.3: Mini-Mast $1\% < \zeta < 4\%$ – comparação dos métodos com 5% de ruído.

5.3.3

CASE: $1\% < \zeta < 4\%$ com altos níveis de ruído (10%)

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8010	0.8016	4.3644	6.1041	6.1568
ERA	0.8052	0.8735	4.0600	-	6.1552
ERA/DC	0.7977	0.8811	5.0567	-	6.1566
OKID/ERA	0.7972	0.8026	4.3820	6.0937	6.1604
OKID/ERA/DC	0.7973	0.8026	4.3818	6.0946	6.1599

Tabela 5.6: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com amortecimento médio: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	$\zeta_1(\%)$	$\zeta_2(\%)$	$\zeta_3(\%)$	$\zeta_4(\%)$	$\zeta_5(\%)$
REAL	1.80	1.80	1.20	1.00	1.00
ERA	1.13	10.63	0.79	-	0.98
ERA/DC	2.22	0.45	1.01	-	1.01
OKID/ERA	2.16	1.65	4.52	2.51	2.61
OKID/ERA/DC	2.16	1.67	4.53	2.52	2.62

Tabela 5.7: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com amortecimento médio: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Para 10% de ruído, os resultados (Tabelas 5.6 e 5.7), mostram que o ERA e ERA/DC, têm problemas para identificar alguns modos (o modo 4 não foi identificado) e obtendo erros de 16% aproximadamente como no caso de ω_3 com o ERA/DC; diferente, o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC são mais robustos ao ruído para a identificação das frequências naturais com erros menores a 0.5%, diferenciando os dois pares de modos muito próximos à frequências naturais quase idênticas. Os erros na identificação dos fatores de amortecimento modais usando OKID se mantém com respeito ao caso de 5% de ruído, já no caso do ERA os erros são entre 49% para ζ_2 , e 2% para ζ_5 , maiores que no caso de 5% de ruído; e com o ERA/DC o erro de ζ_2 aumentou para 75%. A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.4. Observa-se que com ERA/DC um modo estranho ao sistema é introduzido.

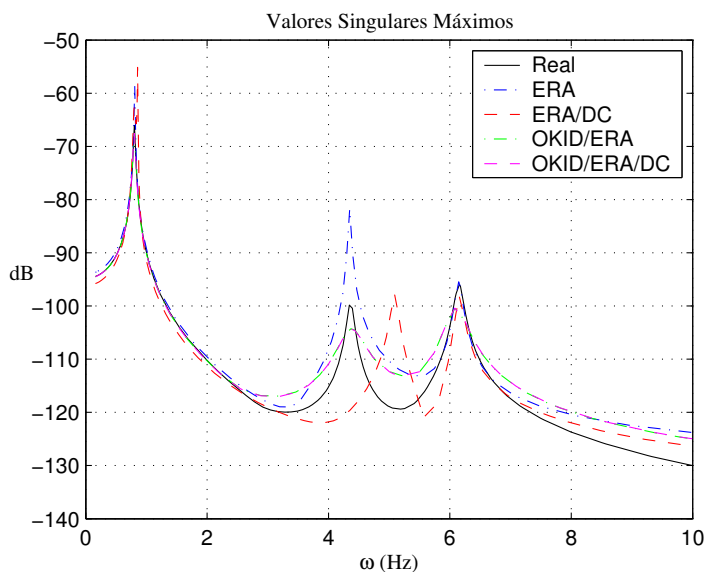


Figura 5.4: Mini-Mast $1\% < \zeta < 4\%$ – comparação dos métodos com 10% de ruído.

5.4

Sistema com grande amortecimento

Incrementamos os fatores de amortecimento do sistema ($\times 4$) para comparar a robustez dos métodos quando o sistema tem porcentagens de amortecimento relativamente grandes ($\zeta > 4\%$).

Desta vez foram usados só $p = 35$ ($p + 1$ parâmetros de Markov do observador) nos métodos com OKID; $k = 100$ ($k + 1$ parâmetros de Markov do sistema) no ERA e OKID/ERA e $k = 130$ no ERA/DC e OKID/ERA/DC.

A Tab. 5.8 mostra os parâmetros modais do sistema com grande amortecimento.

modo N°	ω (Hz)	ζ (%)
1	0.8029	7.2
2	0.8035	7.2
3	4.3691	4.8
4	6.1086	4.0
5	6.1614	4.0

Tabela 5.8: Parâmetros modais do sistema com grande amortecimento: frequências naturais (ω) e fatores de amortecimento modal (ζ).

5.4.1

CASO: $\zeta > 4\%$ com baixos níveis de ruído (1%)

Os resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com grande amortecimento para níveis de ruído de 1% se apresentam nas Tabelas 5.9 e 5.10.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8029	0.8035	4.3691	6.1086	6.1614
ERA	0.7981	0.8172	4.3811	6.0979	6.1831
ERA/DC	0.8077	0.8115	4.3719	6.0930	6.1483
OKID/ERA	0.8033	0.8035	4.3656	6.1031	6.1735
OKID/ERA/DC	0.8033	0.8035	4.3654	6.1032	6.1741

Tabela 5.9: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com grande amortecimento: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	$\zeta_1(\%)$	$\zeta_2(\%)$	$\zeta_3(\%)$	$\zeta_4(\%)$	$\zeta_5(\%)$
REAL	7.20	7.20	4.80	4.00	4.00
ERA	8.59	7.67	5.00	3.86	3.59
ERA/DC	8.29	7.87	4.48	3.91	4.08
OKID/ERA	7.18	7.21	5.24	4.10	4.10
OKID/ERA/DC	7.19	7.21	5.24	4.10	4.11

Tabela 5.10: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com grande amortecimento: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Para baixos níveis de ruído, os parâmetros modais do sistema com grandes fatores de amortecimento, podem ser identificados facilmente por qualquer dos métodos estudados. Neste caso, o ERA e o ERA/DC são tão bons quanto os métodos com OKID pois os parâmetros de Markov do sistema tem decaimento rápido.

A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.5.

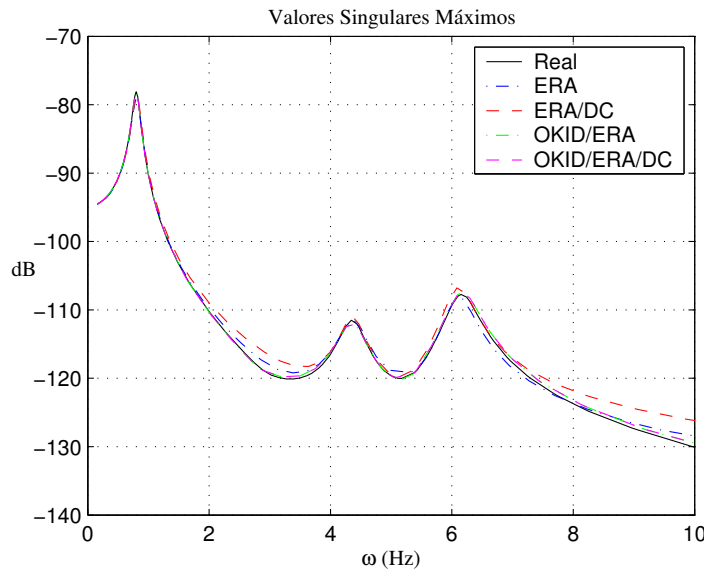


Figura 5.5: Mini-Mast $\zeta > 4\%$ – comparação dos métodos com 1% de ruído.

5.4.2

CASO: $\zeta > 4\%$ com medianos níveis de ruído (5%)

Os resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com grande amortecimento para níveis de ruído de 5% se apresentam nas Tabelas 5.11 e 5.12.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8029	0.8035	4.3691	6.1086	6.1614
ERA	0.8026	0.8168	4.3893	6.0948	6.1957
ERA/DC	0.8011	0.8132	4.3498	6.0567	6.1503
OKID/ERA	0.8017	0.8057	4.4116	6.0830	6.1505
OKID/ERA/DC	0.8018	0.8058	4.4079	6.0816	6.1417

Tabela 5.11: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com grande amortecimento: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	7.20	7.20	4.80	4.00	4.00
ERA	7.16	7.22	3.95	4.07	3.86
ERA/DC	9.11	5.95	4.27	5.06	3.38
OKID/ERA	7.21	7.52	7.12	3.96	5.34
OKID/ERA/DC	7.20	7.52	7.10	3.96	5.40

Tabela 5.12: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com grande amortecimento: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Aumentando o nível de ruído para 5%, todos os métodos conseguem dar bons resultados na identificação dos parâmetros modais do sistema. A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.6.

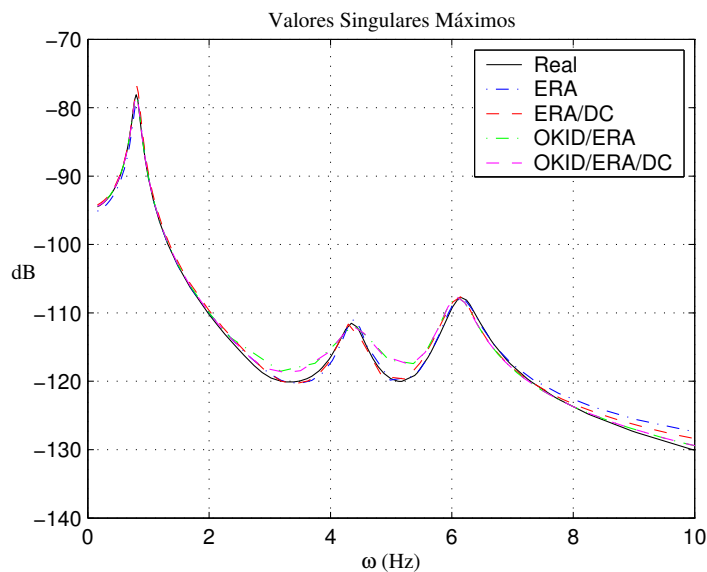


Figura 5.6: Mini-Mast $\zeta > 4\%$ – comparação dos métodos com 5% de ruído.

5.5

Sistema com pouco amortecimento

Para estudar a robustez dos métodos na presença de ruído no caso de um sistema pouco amortecido ($\zeta < 1\%$), os fatores de amortecimento modais do sistema foram reduzidos ($\times 0.5$). A Tabela 5.13 mostra os parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento.

modo N°	ω (Hz)	ζ (%)
1	0.8009	0.9
2	0.8015	0.9
3	4.3641	0.6
4	6.1038	0.5
5	6.1566	0.5

Tabela 5.13: Parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento: frequências naturais (ω) e fatores de amortecimento modal (ζ).

Nos algoritmos, foi usado o mesmo número de parâmetros de Markov do observador e do sistema que no caso de amortecimento médio porque com pouco amortecimento o decaimento é lento.

5.5.1

CASO: $\zeta < 1\%$ com baixos níveis de ruído (1%)

Os resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento para níveis de ruído de 1% se apresentam nas Tabelas 5.14 e 5.15.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8009	0.8015	4.3641	6.1038	6.1566
ERA	0.7958	0.8156	4.3654	6.1020	6.1599
ERA/DC	0.7959	0.8070	4.3649	6.1040	6.1589
OKID/ERA	0.8009	0.8014	4.3656	6.1049	6.1559
OKID/ERA/DC	0.8009	0.8014	4.3656	6.1048	6.1559

Tabela 5.14: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

Para 1% de ruído, todos os métodos conseguem identificar as frequências e diferenciar os modos modos muito próximos à frequências

naturais quase idênticas, com o ERA e o ERA/DC os erros são menores a 2%, e com o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC os erros são menores a 0.1%.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	0.90	0.90	0.60	0.50	0.50
ERA	1.92	1.17	0.81	0.49	0.49
ERA/DC	2.03	1.11	0.69	0.49	0.49
OKID/ERA	0.89	0.90	0.76	0.59	0.54
OKID/ERA/DC	0.89	0.90	0.76	0.59	0.54

Tabela 5.15: Resultados da identificação com 1% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Com o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC obtém-se relativamente bons resultados na identificação dos fatores de amortecimento modais, o maior erro com ambos é 27% para ζ_3 , erros menores a 1.2% são obtidos para ζ_1 e ζ_2 usando o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC; mas com o ERA e o ERA/DC os resultados obtidos não são bons, os erros obtidos são 113% e 126% para ζ_1 com o ERA e o ERA/DC respectivamente, porém os fatores de amortecimento associados aos modos 4 e 5 têm erros pequenos de 2%. Portanto, o ERA e o ERA/DC não são robustos na identificação dos fatores de amortecimento quando o sistema tem pouco amortecimento, considerando que ainda o ruído é só de 1%.

A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.7.

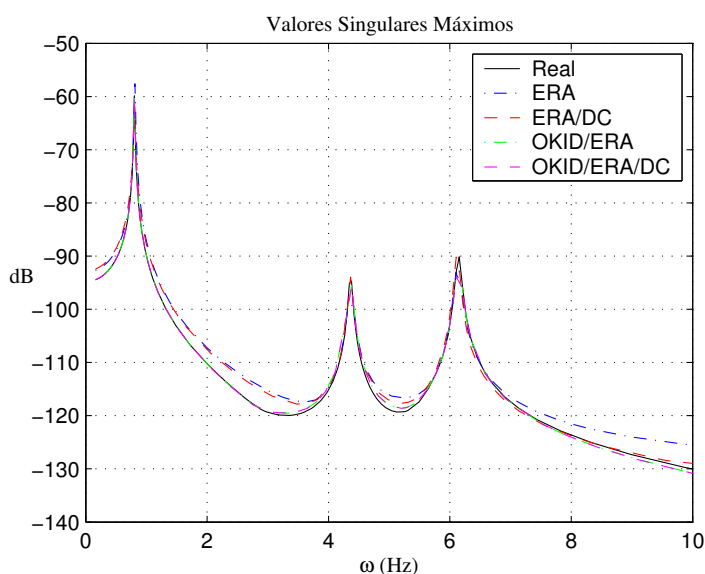


Figura 5.7: Mini-Mast $\zeta < 1\%$ – comparação dos métodos com 1% de ruído.

5.5.2

CASO: $\zeta < 1\%$ com medianos níveis de ruído (5%)

Os resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento para níveis de ruído de 5% se apresentam nas Tabelas 5.16 e 5.17.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8009	0.8015	4.3641	6.1038	6.1566
ERA	0.7868	0.8183	4.3727	6.1039	6.1570
ERA/DC	0.7802	0.7872	4.3727	-	6.1532
OKID/ERA	0.8009	0.8012	4.3843	6.1192	6.1484
OKID/ERA/DC	0.8009	0.8011	4.3843	6.1186	6.1484

Tabela 5.16: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	0.90	0.90	0.60	0.50	0.50
ERA	1.79	1.63	0.75	0.65	0.52
ERA/DC	3.31	1.14	0.56	-	0.40
OKID/ERA	1.03	0.96	1.90	1.88	0.79
OKID/ERA/DC	1.02	0.96	1.90	1.88	0.79

Tabela 5.17: Resultados da identificação com 5% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Para 5% de ruído, o ERA/DC não consegue identificar o modo 4, um dos modos muito próximos do sistema com pouco amortecimento. O ERA consegue diferenciar os modos muito próximos à frequências quase idênticas obtendo-se bons resultados na identificação das frequências naturais do sistema com erros menores a 2%, mas os fatores de amortecimento identificados associados aos modos 1 e 2 têm erros de 99% e 81% respectivamente, já os fatores de amortecimento associados aos modos 3, 4 e 5 têm erros menores a 30%. O OKID/ERA e OKID/ERA/DC conseguem identificar bem as frequências naturais do sistema, com erros menores a 0.5%, e diferenciar os modos próximos; também os fatores de amortecimento associados aos modos 1 e 2 são relativamente bem estimados com erros de 14% e 7% respectivamente, mas os fatores de amortecimento dos modos 3, 4 e 5 não são bem estimados com erros de 217%, 276% e 58% respectivamente.

A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.8.

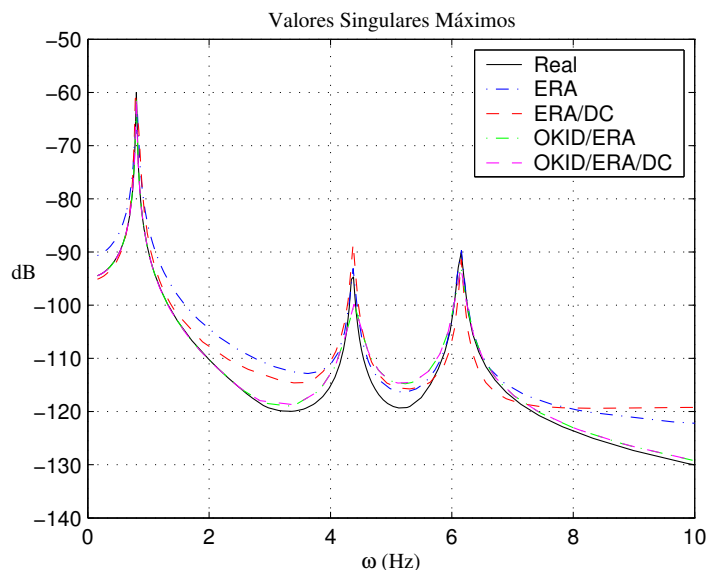


Figura 5.8: Mini-Mast $\zeta < 1\%$ – comparação dos métodos com 5% de ruído.

5.5.3
CASO: $\zeta < 1\%$ com altos níveis de ruído (10%)

Os resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento para níveis de ruído de 10% se apresentam nas Tabelas 5.18 e 5.19.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8009	0.8015	4.3641	6.1038	6.1566
ERA	0.7903	0.8142	4.3621	-	6.1524
ERA/DC	0.7961	0.8047	4.3670	-	6.1553
OKID/ERA	0.7998	0.8014	3.7460	6.0965	6.1554
OKID/ERA/DC	0.7987	0.8017	4.2615	6.1457	6.1774

Tabela 5.18: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

Para 10% de ruído, o OKID/ERA e OKID/ERA/DC conseguem diferenciar os modos muito próximos, mas neste caso, com o OKID/ERA os erros são menores que no caso do OKID/ERA/DC, em especial na frequência natural associada ao modo 3 (14% de erro com o OKID/ERA

e 2.4% com o OKID/ERA/DC). O ERA e o ERA/DC não conseguem identificar o modo 4.

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	0.90	0.90	0.60	0.50	0.50
ERA	1.16	0.38	0.46	-	0.44
ERA/DC	1.87	0.39	0.54	-	0.44
OKID/ERA	1.29	0.88	4.17	2.22	2.64
OKID/ERA/DC	1.13	0.96	3.28	3.42	1.77

Tabela 5.19: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com pouco amortecimento: fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Na identificação dos fatores de amortecimento, com o ERA os erros são: 29%, 58%, 23% e 12% para ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 e ζ_5 respectivamente (o modo 4 não foi identificado); com o ERA/DC os erros para os mesmos fatores de amortecimento são: 108%, 57%, 10% e 12% respectivamente; já com o OKID/ERA os erros são menores para ζ_1 e ζ_2 : 43% e 2%, mas bem maiores para ζ_3 , ζ_4 e ζ_5 : 595%, 344% e 428% respectivamente; e com o OKID/ERA/DC os erros são ligeiramente menores: 26%, 7%, 447%, 584% e 254% para ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 e ζ_5 respectivamente.

A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.9. Observa-se que com o ERA e ERA/DC, modos estranhos ao sistema são introduzidos.

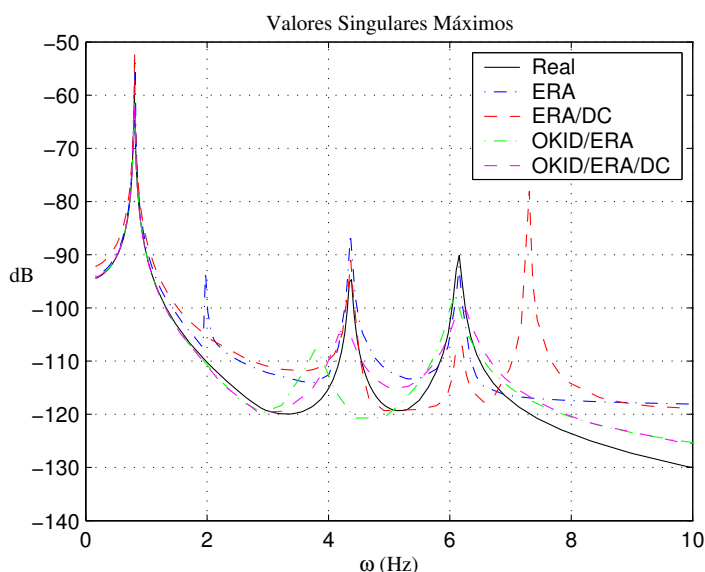


Figura 5.9: Mini-Mast $\zeta < 1\%$ – comparação dos métodos com 10% de ruído.

5.5.4

CASO: $\zeta < 1\%$ com altos níveis de ruído (10%) e com $p=100$

No caso anterior, os resultados na identificação das frequências naturais do sistema usando o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC são bons, mas na identificação dos fatores de amortecimento modais, os erros são grandes como foram mencionados anteriormente. Isto acontece porque o número de parâmetros de Markov do observador usados nos métodos com OKID não são suficientes pois o decaimento é lento no sistema com pouco amortecimento, mas foram usados $p = 50$ parâmetros de Markov do observador para manter os tempos de execução dos algoritmos quase iguais e poder fazer a comparação. Se agora usamos $p = 100$ parâmetros de Markov do observador nos métodos com OKID para procurar a melhor performance do OKID/ERA/DC; e $k = 250$ parâmetros de Markov do sistema no ERA e OKID/ERA e OKID/ERA/DC, os novos resultados da identificação dos parâmetros modais do sistema com pouco amortecimento para níveis de ruído de 10% se apresentam nas Tabelas 5.20 e 5.21.

	ω_1 (Hz)	ω_2 (Hz)	ω_3 (Hz)	ω_4 (Hz)	ω_5 (Hz)
REAL	0.8009	0.8015	4.3641	6.1038	6.1566
ERA	0.7971	0.8138	-	6.1157	6.1960
ERA/DC	0.7962	0.8162	-	6.1055	6.1871
OKID/ERA	0.8020	0.8021	4.3442	6.1131	6.1723
OKID/ERA/DC	0.8019	0.8021	4.3452	6.1124	6.1717

Tabela 5.20: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com pouco amortecimento (com $p=100$): frequências naturais (ω_i , associado ao i -ésimo modo).

	ζ_1 (%)	ζ_2 (%)	ζ_3 (%)	ζ_4 (%)	ζ_5 (%)
REAL	0.90	0.90	0.60	0.50	0.50
ERA	1.72	1.45	-	0.43	0.55
ERA/DC	1.86	1.51	-	0.34	0.59
OKID/ERA	1.00	0.63	0.94	0.68	1.00
OKID/ERA/DC	1.00	0.62	0.96	0.63	0.95

Tabela 5.21: Resultados da identificação com 10% de ruído para o sistema com pouco amortecimento (com $p=100$): fatores de amortecimento modal (ζ_i , associado ao i -ésimo modo).

Nos resultados, observa-se que com o ERA e o ERA/DC, o modo 3 não é identificado e o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC sim conseguem identificar todas as frequências naturais, diferenciando os modos muito próximos à quase idênticas frequências. Na identificação das frequências naturais, os erros com o ERA são menores a 1.5%; com o ERA/DC são menores a 2%; com o OKID/ERA os erros são menores a 0.5%, melhorando sua performance com respeito do caso anterior com $p = 50$ especialmente no ω_3 ; e com o OKID/ERA/DC os erros também são bem menores.

Os resultados obtidos para os fatores de amortecimento com o ERA e ERA/DC são similares que no caso anterior, com erros entre 106% e 10%. Já com o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC, com $p=100$, os erros foram reduzidos significativamente, sendo menores a 90%.

A comparação dos máximos valores singulares das Funções de Transferência se mostra na Fig. 5.10. Observa-se que com o ERA e ERA/DC, similar que no caso anterior, modos estranhos ao sistema são introduzidos.

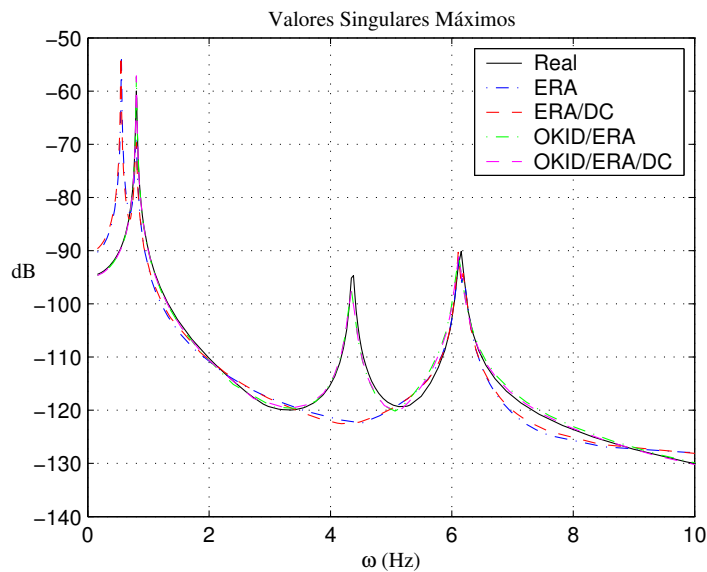


Figura 5.10: Mini-Mast $\zeta < 1\%$ – comparação dos métodos com 10% de ruído e $p=100$.

5.6

Conclusões do capítulo

1. No caso do sistema com amortecimento médio, todos os métodos produzem relativamente bons resultados com níveis de ruído baixos, mas quando o ruído é 10% só OKID/ERA e OKID/ERA/DC conseguem diferenciar os modos muito próximos, identificam bem todas as

freqüências naturais mas com erros grandes nos fatores de amortecimento identificados.

2. No caso do sistema com grande amortecimento, todos os métodos conseguem identificar bem os parâmetros modais do sistema e diferenciar os modos muito próximos com freqüências quase iguais, na presença de níveis de ruído de 1% e 5%.
3. No caso do sistema com pouco amortecimento, o ERA e o ERA/DC não conseguem identificar bem os modos, inclusive quando o ruído não é muito alto (5%), alguns dos modos não foram identificados; e quando o ruído é alto (10%), com o ERA e ERA/DC também alguns dos modos não foram identificados e modos estranhos ao sistema foram introduzidos. Já o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC são mais robustos na presença de altos níveis de ruído e conseguem diferenciar os modos muito próximos e identificando relativamente bem as freqüências naturais mas com erros relativamente grandes nos fatores de amortecimento modais.
4. Na presença de altos níveis de ruído o OKID/ERA/DC é ligeiramente superior ao OKID/ERA como no caso do sistema com pouco amortecimento e 10% de ruído, porque na operação de correlação dos dados, o OKID/ERA/DC consegue eliminar grande parte do ruído presente nos dados, além de modelar um sistema mais estável com decaimento mais rápido dos parâmetros de Markov.
5. Como foi demonstrado no último caso analisado, $\zeta < 1\%$ e 10% de ruído, com $p = 100$ ($p+1$ parâmetros de Markov do observador), a performance dos métodos usando OKID é melhor que com $p = 50$, porque o decaimento dos parâmetros de Markov para o sistema com pouco amortecimento é lento.
6. A desvantagem de usar maior número de parâmetros de Markov do observador e do sistema é que o tempo computacional é incrementado, mas, de outro lado, menor número de parâmetros de Markov do sistema são necessários usando OKID que com o ERA e o ERA/DC quando o sistema tem pouco amortecimento, pois o número de parâmetros de Markov com observador garantem o decaimento.
7. Quanto maior seja a contaminação dos dados com ruído, é necessário o cálculo de maior número de parâmetros de Markov e também maior número de amostras e tempo de amostragem.