



Daniel Augusto Pereira

Detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis com controle ativo de vibração

06/2014

CAMPINAS
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

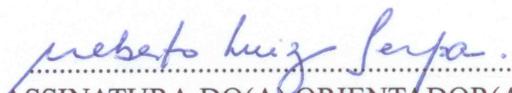
Daniel Augusto Pereira

Detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis com controle ativo de vibração

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Projeto Mecânico e Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Alberto Luiz Serpa

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO Daniel Augusto Pereira, E ORIENTADO PELO PROF. DR Alberto Luiz Serpa.


.....
ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

CAMPINAS
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

P414d Pereira, Daniel Augusto, 1983-
Detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis com controle ativo de
vibração / Daniel Augusto Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Alberto Luiz Serpa.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Estruturas flexíveis. 2. Vibração - Controle. 3. Controle H (Infinito). 4.
Indicadores. I. Serpa, Alberto Luiz, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Sensor fault detection in flexible structures with active vibration control

Palavras-chave em inglês:

Flexible structures

Vibration - Control

H Control (Infinity)

Indicators

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Alberto Luiz Serpa [Orientador]

Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega

José Maria Campos dos Santos

Marcelo Areias Trindade

Vicente Lopes Júnior

Data de defesa: 06-12-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

TESE DE DOUTORADO

**Detecção de falhas de sensores em estruturas
flexíveis com controle ativo de vibração**

Autor: Daniel Augusto Pereira
Orientador: Alberto Luiz Serpa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:



Prof. Dr. Alberto Luiz Serpa, Presidente
DMC/FEM/UNICAMP



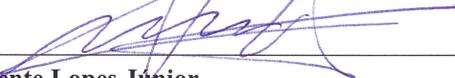
Prof. Dr. Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega
DMC/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos
DMC/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Marcelo Areias Trindade
SEM/EESC/USP



Prof. Dr. Vicente Lopes Júnior
DEM/FEIS/UNESP

Campinas, 06 de dezembro de 2013.

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai e à minha mãe.

Agradecimentos

Agradeço aos meus avós, por apoiarem a educação de meus pais.

Agradeço aos meus pais, por tudo.

Agradeço aos colegas de laboratório Fuga e Alysson, pela convivência e amizade.

Agradeço aos amigos que participaram de minha vida em Campinas.

Agradeço à Karen pela companheirismo.

Agradeço à CAPES e à PRPG/UNICAMP, pelo apoio financeiro.

Resumo

PEREIRA, Daniel Augusto. Detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis com controle ativo de vibração. 2013. 138p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Partindo-se do princípio de que detectar falhas em sistemas realimentados pode ser considerada tarefa difícil, nessa tese é proposto um método para detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis sujeitas a controle ativo de vibração. O método é baseado num esquema com banco de estimadores para geração de resíduos e no uso de indicadores para a análise quantitativa desses resíduos. O esquema de banco de estimadores permite o isolamento das falhas. Os estimadores utilizados são observadores de saída, filtros de Kalman e filtros H-infinito. Já os indicadores propostos são versões modificadas da diferença entre os valores RMS das saídas medidas e estimadas, a soma do módulo do erro de estimativa, a soma quadrática do erro de estimativa e o *modal assurance criterion*. É proposto um reescalamento dos indicadores e também um novo indicador, definido pelo produto das versões modificadas e reescaladas dos indicadores clássicos. Inicialmente a técnica foi validada em simulações, primeiro com um modelo de elementos finitos de uma estrutura de placa e posteriormente com um modelo de placa identificado experimentalmente, ambos sob controle ativo de vibração. Experimentos com a estrutura de placa também foram realizados e comprovaram a eficácia da técnica.

Palavras-chave: detecção de falhas, controle de vibração, H-infinito, indicador.

Abstract

PEREIRA, Daniel Augusto. Sensor fault detection in flexible structures with active vibration control. 2013. 138p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Assuming that fault detection in feedback systems can be considered a hard task, it is proposed in this thesis a method for sensor fault detection in flexible structures subjected to active vibration control. The method is based on a scheme with bank of estimators for residual generation and indicators for quantitative analysis of residues. The bank estimators scheme allows the fault isolation. The estimators used are output observers, Kalman filters and H-infinity filters. The proposed indicators are modified versions of the difference between RMS values of measured and estimated outputs, the sum of the modulus of the estimation error, the quadratic sum of the estimation error and the modal assurance criterion. It is proposed a rescaling of the indicators and also a new indicator, defined by the product of the modified and rescaled versions of classical indicators. Initially the technique is validated in simulations, first with a finite element model of a plate structure and latter with an experimentally identified plate model, both under active vibration control. Experiments with the plate were also performed and proved the effectiveness of the technique.

Keywords: fault detection, vibration control, H-infinity, indicator .

Lista de Ilustrações

2.1	Gerador de resíduo.	12
2.2	Formulação do problema \mathcal{H}_∞	15
2.3	Banco de estimadores.	17
3.1	Malha de elementos finitos com as posições dos sensores (S) e atuadores (A).	33
3.2	Elemento finito quadrangular de placa e graus de liberdade.	33
3.3	Interação entre estrutura e elementos piezelétricos.	35
3.4	Diagrama de valores singulares dos sistemas com e sem controle.	37
3.5	Placa experimental.	39
3.6	Sensor e atuador piezelétricos.	39
3.7	Descrição esquemática da placa com sensores e atuadores.	40
3.8	Amplificadores e condicionador de sinais.	41
3.9	Funções de coerência dos sinais medidos.	43
3.10	FRF dos sinais medidos e do modelo identificado.	44
3.11	Diagrama de valores singulares dos sistemas com e sem controle.	46
4.1	Resposta temporal com e sem controle.	50
4.2	Falha de 50% no sensor 1 - observador de saída - MEF.	51
4.3	Falha de 50% no sensor 1 - filtro de Kalman - MEF.	51
4.4	Falha de 50% no sensor 1 - filtro \mathcal{H}_∞ - MEF.	52
4.5	Falha de 50% no sensor 8 - observador de saída - MEF.	52
4.6	Falha de 50% no sensor 8 - filtro de Kalman - MEF.	53
4.7	Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ - MEF.	53
4.8	Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - observador de saída - MEF.	54
4.9	Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro de Kalman -MEF.	54
4.10	Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro \mathcal{H}_∞ - MEF.	55
4.11	Método Abdelghani e Friswell (2007) - MEF.	56
4.12	Método Kerschen <i>e outros</i> (2005) - MEF.	57
4.13	Método Kerschen <i>e outros</i> (2005), falhas simultâneas - MEF.	58
4.14	Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicador reescalado - MEF.	60
4.15	Resposta temporal com e sem controle.	62
4.16	Falha de 50% no sensor 1 - observador, indicador reescalado - modelo ERA.	64

4.17 Falha de 50% no sensor 1 - filtro de Kalman, indicador reescalado - modelo ERA.	65
4.18 Falha de 50% no sensor 1 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicador reescalado - modelo ERA.	65
4.19 Falha de 50% no sensor 8 - observador, indicador reescalado - modelo ERA.	66
4.20 Falha de 50% no sensor 8 - filtro de Kalman, indicador reescalado - modelo ERA.	66
4.21 Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicador reescalado - modelo ERA.	67
4.22 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - observador - modelo ERA.	67
4.23 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro de Kalman - modelo ERA.	68
4.24 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro \mathcal{H}_∞ - modelo ERA.	68
4.25 Resposta temporal experimental da placa com controle de vibração.	72
4.26 Falha de 50% no sensor 1 - observador - experimental.	73
4.27 Falha de 50% no sensor 2 - observador - experimental.	74
4.28 Falha de 50% no sensor 3 - observador - experimental.	74
4.29 Falha de 50% no sensor 4 - observador - experimental.	75
4.30 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - observador - experimental.	75
4.31 Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - observador - experimental.	76
4.32 Falha de 50% no sensor 1 - Kalman - experimental.	78
4.33 Falha de 50% no sensor 2 - Kalman - experimental.	79
4.34 Falha de 50% no sensor 3 - Kalman - experimental.	79
4.35 Falha de 50% no sensor 4 - Kalman - experimental.	80
4.36 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - Kalman - experimental.	80
4.37 Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - Kalman - experimental.	81
4.38 Falha de 50% no sensor 1 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	83
4.39 Falha de 50% no sensor 2 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	84
4.40 Falha de 50% no sensor 3 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	84
4.41 Falha de 50% no sensor 4 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	85
4.42 Falha de 50% nos sensores 1 e 5 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	85
4.43 Falha de 50% nos sensores 2 e 7 - \mathcal{H}_∞ - experimental.	86
4.44 Indicador Produto - observador de saída.	90
4.45 Indicador Produto - filtro de Kalman.	91
4.46 Indicador Produto - filtro \mathcal{H}_∞ .	92
A.1 Falha de 10% no sensor 6 - observador de saída - MEF.	104
A.2 Falha de 10% no sensor 6 - filtro de Kalman - MEF.	104
A.3 Falha de 10% no sensor 6 - filtro \mathcal{H}_∞ - MEF.	105
A.4 Falha de 10% no sensor 4 - observador de saída - MEF.	105
A.5 Falha de 10% no sensor 4 - filtro de Kalman - MEF.	106

A.6	Falha de 10% no sensor 4 - filtro \mathcal{H}_∞ - MEF.	106
A.7	Falha de 10% no sensor 3 - observador de saída - modelo ERA.	107
A.8	Falha de 10% no sensor 3 - filtro de Kalman - modelo ERA.	108
A.9	Falha de 10% no sensor 3 - filtro \mathcal{H}_∞ - modelo ERA.	108
A.10	Falha de 10% no sensor 5 - observador de saída - modelo ERA.	109
A.11	Falha de 10% no sensor 5 - filtro de Kalman - modelo ERA.	109
A.12	Falha de 10% no sensor 5 - filtro \mathcal{H}_∞ - modelo ERA.	110
C.1	Características da função de ponderação passa-baixas.	116
C.2	Respostas em frequência de um sistema sem controle e de filtros de ponderação.	117
C.3	Diagrama de blocos do sistema aumentado.	117

Lista de Tabelas

3.1	Propriedades, dimensões e frequências naturais da placa.	32
3.2	Filtros de ponderação do controlador \mathcal{H}_∞ - planta modelada MEF	37
3.3	Especificação de equipamentos.	42
3.4	Filtros de ponderação do controlador \mathcal{H}_∞ - planta identificada	45
4.1	Razões entre amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - elementos finitos. . .	48
4.2	Redução das máximas amplitudes com controle - elementos finitos	48
4.3	Filtros de ponderação dos estimadores \mathcal{H}_∞ - planta MEF	49
4.4	Comparação dos resultados obtidos com modelo de elementos finitos.	59
4.5	Razões entre amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - identificado.	61
4.6	Redução das máximas amplitudes com controle - identificado.	61
4.7	Filtros de ponderação dos estimadores \mathcal{H}_∞ - planta identificada	63
4.8	Comparação dos resultados obtidos com modelo identificado experimentalmente. .	69
4.9	Redução das máximas amplitudes em virtude do controlador.	71
4.10	Comparação dos resultados obtidos nos testes experimentais.	88
A.1	Razões entre amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - elementos finitos. . .	103
A.2	Razões entre amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - identificado.	103

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	xv
Lista de Tabelas	xix
SUMÁRIO	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Visão geral	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Abordagem do problema	4
1.4 Breve revisão bibliográfica em validação de sensores	6
1.5 Estrutura da tese	9
2 DETECÇÃO E ISOLAMENTO DE FALHAS	11
2.1 Estimadores de saída	11
2.1.1 Observador de saída	12
2.1.2 Filtro de Kalman	13
2.1.3 Filtro \mathcal{H}_∞	15
2.2 Banco de estimadores	17
2.2.1 Trabalhando com dados discretos	19
2.2.2 Indicadores adaptados - proposta	20
2.2.3 Consideração importante	22
2.2.4 Reescalamento dos indicadores	23
2.2.5 Indicador Produto	24
2.3 Métodos de referência	24
2.3.1 Método de Abdelghani	24
2.3.2 Método de Kerschen	27
3 ESTRUTURA DE PLACA	31
3.1 Placa modelada pelo Método dos Elementos Finitos	31
3.1.1 Modelo de elementos finitos	32

3.1.2	Modelo dos sensores e atuadores	34
3.1.3	Modelo no espaço de estados	35
3.1.4	Controlador	36
3.2	Placa experimental	38
3.2.1	Estrutura física e instrumentação	38
3.2.2	Identificação	42
3.2.3	Controle	45
3.3	Falhas multiplicativas	46
4	RESULTADOS	47
4.1	Detecção de falhas com modelo de Elementos Finitos da placa	47
4.1.1	Detecção de falhas com banco de estimadores	48
4.1.2	Métodos de Abdelghani e Kerschen	56
4.1.3	Comentários	58
4.2	Detecção de falhas com modelo de placa identificado experimentalmente	61
4.2.1	Detecção de falhas com banco de estimadores	63
4.2.2	Comentários	69
4.3	Detecção de falha via testes experimentais com placa	71
4.3.1	Detecção de falhas com banco de estimadores - observador de saída	73
4.3.2	Detecção de falhas com banco de estimadores - filtro de Kalman	78
4.3.3	Detecção de falhas com banco de estimadores - filtro \mathcal{H}_∞	83
4.3.4	Comentários	87
4.4	Indicador Produto	88
4.5	Comentário gerais sobre os resultados	89
5	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICES	101
A	RESULTADOS COM FALHAS SUAVES E MEDIÇÕES RUIDOSAS	103
A.1	Detecção de falhas com modelo de Elementos Finitos	103
A.2	Detecção de falhas com modelo de placa identificado experimentalmente	107
B	NORMA \mathcal{H}_∞ E PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO COM RESTRIÇÃO LMI	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 Visão geral

Em muitas áreas da engenharia há um grande interesse em melhorar o desempenho de sistemas estruturais, contudo sem adicionar grande quantidade de massa ou elevar consideravelmente o consumo de energia (HURLEBAUS E GAUL, 2006). Para isso são construídos sistemas com Controle Ativo de Vibração (AVC - *Active Vibration Control*) ou Controle Ativo de Ruído (ANC - *Active Noise Control*), ou ainda, mais raramente, controle ativo de amortecimento, forma ou deformação. Aplicações desse tipo podem ser encontradas em estruturas espaciais, aeronáuticas, automotivas, estruturas civis, máquinas ferramentas, sistemas médicos, aerogeradores etc. Atuadores embarcados na asa de um avião ou em uma hélice de helicóptero, por exemplo, podem induzir deformações no aerofólio de modo a modificar a força de sustentação e ajudar no controle estático e dinâmico de aeroelasticidade (CHOPRA, 2002). Estruturas como essa podem ser chamadas de Estruturas Inteligentes. Com elas, é possível projetar estruturas mais leves (flexíveis, com menos material e por isso mais baratas) e ainda garantir baixo nível de vibração, o que é desejável pois vibrações excessivas aumentam as chances de aparecimento de falhas mecânicas além de provocarem desconforto.

Uma Estrutura Inteligente contém sensores e atuadores distribuídos, além de estar conectada a uma unidade de processamento que analisa as respostas dos sensores e através de alguma regra de controle comanda os atuadores para aplicarem deformações ou deslocamentos com o intuito de alterar a resposta do sistema (CHOPRA, 2002). Normalmente essas Estruturas Inteligentes são compostas de estruturas flexíveis. O estudo delas é multidisciplinar, envolve disciplinas como ciência dos materiais, mecânica aplicada, teoria de controle etc (HURLEBAUS E GAUL, 2006). Geralmente os sensores e atuadores são de materiais do tipo:

piezelétricos, ligas com memória de forma, magneto e eletro-reológicos, fibras óticas, etc. (CHOPRA; HURLEBAUS E GAUL, 2002; 2006).

O Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) também pode ser conduzido a partir de Estruturas Inteligentes. Em SHM, dados provenientes de sensores e atuadores acoplados à estrutura são usados para a identificação de danos, sendo estes quaisquer alterações de propriedades geométricas ou de material que afetam negativamente o desempenho do sistema (FARRAR E WORDEN, 2007). A terminologia SHM é usada mais comumente por aqueles que estudam sistemas estruturais nas engenharias aeroespacial, civil e mecânica. Por exemplo, pode-se aumentar a vida útil, sem reduzir segurança, de uma ponte ferroviária de aço ou da fuselagem de uma aeronave aplicando-se técnicas de SHM. Nessas aplicações, ao invés de substituir uma estrutura já com elevado tempo de uso por uma nova, implementa-se o Monitoramento da Integridade Estrutural. Dessa forma, a estrutura pode continuar sendo usada enquanto o monitoramento estiver indicando ausência de falhas, reduzindo-se custos e mantendo-se a segurança. Quando o monitoramento indicar o aparecimento de alguma falha, faz-se o reparo, quando possível, ou então substitui-se a estrutura, garantindo-se uma manutenção mais eficiente.

Tanto no Controle Ativo de Vibração quanto no Monitoramento da Integridade Estrutural, são necessários sensores e atuadores confiáveis, livres de falhas. Por isso é interessante desenvolver também técnicas de monitoramento dos sensores e atuadores. Na comunidade de SHM esse assunto tem aparecido nos últimos anos sob o epíteto *Sensor Validation* (FRISWELL E INMAN; KERSCHEN *e outros*; ABDELGHANI E FRISWELL; KULLAA, 1999; 2005; 2007; 2010), ou Validação de Sensores. Quando se trabalha com sensores piezelétricos, algumas falhas típicas são a descolagem e a ruptura do sensor (OVERLY *e outros*, 2009). Uma simplificação comum é adotar falhas multiplicativas (ABDELGHANI E FRISWELL, 2007), ou seja, uma falha significando uma redução percentual da amplitude fornecida pelo sensor. Na

prática esse tipo de falha poderia estar associada, por exemplo, a erros de calibração do sensor. Em muitas aplicações, de SHM ou AVC, há um elevado número de sensores acoplados às estruturas e monitorá-los pode aumentar a confiabilidade do sistema e também tornar o processo de manutenção mais eficiente.

Na comunidade de controle, desenvolveu-se muito nas últimas décadas a área de Detecção e Isolamento de Falhas (FDI - *Fault Detection and Isolation*) (HWANG *e outros*, 2010). É possível encontrar aplicações de FDI em diversas áreas da engenharia, entretanto as técnicas oriundas dessa área têm sido pouco aproveitadas pela comunidade de SHM. Essa constatação motivou o interesse pela investigação da aplicação de técnicas da área de FDI, como geradores de resíduos baseados em observadores de saída, filtros de Kalman e filtros \mathcal{H}_∞ , no problema de Validação de Sensores em Estruturas Inteligentes.

Nesse contexto, percebeu-se ainda uma outra lacuna nos trabalhos (FRISWELL E INMAN; ABDELGHANI E FRISWELL; KERSCHEN *e outros*; KULLAA, 1999; 2007; 2005; 2010) que abordam a Validação de Sensores: as técnicas não são avaliadas na presença de Controle Ativo de Vibração, ou seja, em malha fechada. Estruturas realimentadas oferecem a vantagem de corrigir o efeito de perturbações atuando sobre o sistema. Nesse caso, os efeitos das falhas de sensores sobre as estruturas são atenuados pelo controlador, o que torna mais difícil a tarefa de detecção da falha. Portanto, é necessário investigar de forma mais criteriosa os métodos usados para Validação de Sensores na presença do Controle Ativo de Vibração.

1.2 Objetivo

O objetivo geral dessa tese é indicar um método eficiente de detecção e isolamento de falhas de sensores em estruturas inteligentes, estando a estrutura submetida ao Controle Ativo de Vibração.

Objetivos específicos são:

- A partir de revisão bibliográfica, determinar quais métodos de detecção de falhas de sensores podem ser usados como referência para avaliar o esquema com banco de estimadores.
- Dentro do contexto de bancos de observadores, selecionar alguns estimadores de saída (por exemplo, observador de saída, filtro de Kalman, filtro \mathcal{H}_∞) e determinar quais são aplicáveis ao problema de detecção e isolamento de falhas de sensores em estruturas flexíveis sujeitas a controle ativo de vibração.
- Avaliar algumas métricas (indicadores) para quantificação de sinais de resíduo, adaptá-las para uso no esquema de banco de observadores e indicar a melhor opção.

1.3 Abordagem do problema

O problema de Validação de Sensores em Estruturas Inteligentes sujeitas ao Controle Ativo de Vibração foi abordado usando uma técnica oriunda da área de FDI, onde normalmente se trabalha com sistemas inseridos em malhas de controle. A técnica adotada foi baseada em esquema com bancos de estimadores para a geração de resíduos, que são sinais definidos pela diferença entre as medições e suas estimativas. O banco de estimadores é constituído de diversos estimadores, cada um responsável por monitorar uma falha específica. A aplicação desse

método em Estruturas Inteligentes é uma contribuição dessa tese, já que não foram encontrados na literatura exemplos com aplicações semelhantes do banco de estimadores.

Diferentes tipos de estimadores podem ser empregados nesse esquema de bancos. Neste trabalho optou-se pelos seguintes estimadores: observadores de saída, que são os observadores clássicos de Luenberger; filtros de Kalman, que incorporam informações sobre distúrbios e ruídos de medição em sua formulação; filtros \mathcal{H}_∞ , que podem melhorar a robustez quando empregadas funções de ponderação no projeto. Para a construção do banco foi escolhido um esquema (*Generalized Observer Scheme*) em que o sensor monitorado não é usado no cômputo do resíduo que o monitora, evitando-se assim que dados com falha prejudiquem a análise.

O banco de estimadores fornece um sinal de resíduo para cada sensor monitorado. Para se determinar a ocorrência de falha em algum desses sensores é necessário avaliar quantitativamente a evolução temporal dos resíduos, o que pode ser feito aplicando-se indicadores. Calculando-se um índice para um trecho do sinal de resíduo, é possível comparar o valor obtido com um outro de referência previamente determinado para uma condição sem falha. Desse modo, uma modificação no índice sugere que uma falha apareceu. Com esse intuito alguns indicadores bem conhecidos foram adaptados e utilizados em conjunto com os bancos de estimadores: Diferença RMS; Soma do Módulo do Erro; Soma do Erro ao Quadrado; *Modal Assurance Criterion* - MAC. Na prática esses indicadores somente forneceram resultados razoáveis quando realizado o cálculo adicional da norma euclidiana e um posterior reescalamiento. Essa adaptação dos indicadores clássicos e a proposta do Indicador Produto foram contribuições dessa tese.

Partindo-se da premissa de que detectar falhas de sensores em estruturas com controle de vibração é uma tarefa difícil e pouco abordada na literatura, esse esquema de detecção de falhas com banco de estimadores e indicadores especializados foi aplicado a uma estrutura de placa sujeita a Controle Ativo de Vibração. O controlador empregado foi do tipo \mathcal{H}_∞ e a falha

de sensor foi do tipo multiplicativa, ou seja, ganho multiplicando o valor medido. Inicialmente trabalhou-se com um modelo de elementos finitos de uma placa. Posteriormente a técnica foi aplicada a uma estrutura semelhante construída em bancada experimental, também com controlador \mathcal{H}_∞ para controle de vibração. Essa placa experimental foi modelada a partir de identificação experimental com o método *Eigenstructure Realization Algorithm* - ERA. Foram realizadas simulações com esse modelo identificado e também testes na bancada.

Assim, constatou-se que o esquema de detecção proposto é capaz de realizar a Validação de Sensores em casos realimentados, ou seja, mesmo com o controlador atenuando o efeito dessas falhas o método é capaz de detectá-las e isolá-las. Dentre os estimadores testados, o observador de saída, que é o mais simples, funcionou bem principalmente quando usado em conjunto com o indicador Soma do Erro ao Quadrado. A aplicação com sucesso desse esquema de banco de estimadores, em conjunto com os indicadores especializados, a uma estrutura flexível sujeita ao Controle Ativo de Vibração foi a principal contribuição dessa tese.

1.4 Breve revisão bibliográfica em validação de sensores

Em Dunia *e outros* (1996), Validação de Sensores (*sensor validation*) foi definida como a tarefa de detectar, identificar e reconstruir os sinais dos sensores com falha. Para isso, um modelo, ou outro tipo de conhecimento prévio sobre o sistema, deve ser usado para analisar as medidas fornecidas pelo sensor. Segundo Dunia *e outros* (1996), os vários sensores usados em um sistema sob supervisão costumam apresentar grande correlação entre si. Essa correlação pode ser interpretada sob o ponto de vista de direções principais entre subespaços vetoriais, conceito fundamental da técnica de análise conhecida por PCA (*Principal Component Analysis*). Assim, sensores com medições em direções distintas das principais possivelmente apresentam falhas. Seguindo a ideia de PCA, foi desenvolvido em Dunia *e outros* (1996) um Índice de Validade de

Sensores, aplicado ao monitoramento de sensores de uma caldeira.

Friswell e Inman (1999) constataram a carência de trabalhos estudando Validação de Sensores na área de estruturas inteligentes (*smart structures*). Assumindo-se que geralmente apenas os primeiros modos de uma estrutura são geralmente excitados, foram consideradas duas abordagens para a validação de sensores em uma estrutura inteligente: uma baseada em filtragem modal e outra em PCA, ambas produzindo um sinal de resíduo cujas propriedades estatísticas determinam a ocorrência de falha. Nessas abordagens, as medições são agrupadas em subconjuntos, cada um com a exclusão de um sensor (ou conjunto de sensores) candidato a ter falha. Desse modo, subconjuntos com dados semelhantes indicam possível falha no sensor excluído do grupo. Foram testadas falhas aditivas e multiplicativas em estrutura de viga. O método baseado em filtragem modal foi mais eficiente e falhas multiplicativas foram mais difíceis de serem detectadas e isoladas.

Kerschen *e outros* (2005) ressaltaram a importância da Validação de Sensores na área de SHM e abordaram, além da detecção de falhas de sensor, a reconstrução dos sinais medidos pelos sensores com falha. A detecção de falhas foi baseada em PCA, consistindo na comparação entre o subespaço gerado por dados de referência saudáveis e os subespaços gerados por subconjuntos dos dados sob supervisão. Esses subconjuntos são construídos retirando-se das medições os sensores candidatos a terem falha, seguindo a ideia apresentada em Friswell e Inman (1999). A comparação entre os subespaços se dá através da avaliação do ângulo entre eles. Quanto menor o ângulo, mais parecidos são os subespaços, indicando que o sensor excluído do subconjunto era a fonte de não similaridades, ou seja, o sensor com falha. A técnica foi aplicada a uma estrutura de viga com dez acelerômetros e isolou muito bem falhas multiplicativas e também falhas caracterizadas por substituição de trecho da medição por sequência do tipo ruído branco.

Abdelghani e Friswell (2007) partiram da premissa de que estruturas inteligentes normalmente são instrumentadas com um número de sensores maior que o número de modos excitados. Isso impõe redundância que pode ser usada em conjunto com modelo modal da estrutura para gerar resíduos. Assim como em Friswell e Inman (1999) e Kerschen *e outros* (2005), os dados foram divididos em subconjuntos, cada um excluindo um sensor monitorado, e um sinal de resíduo foi calculado a partir dos dados de cada subconjunto. Um índice de correlação foi definido para cada sensor, sendo calculado a partir do resíduo gerado pelo subconjunto que não contém esse sensor. A técnica foi aplicada a uma estrutura flexível, um quadro de aço, com 28 acelerômetros sujeitos a falhas multiplicativas e foi capaz de isolar até mesmo falhas simultâneas em dois sensores.

Kullaa (2010) apontou como desvantagem do PCA a necessidade de se determinar o número de componentes principais, tarefa nem sempre simples quando os dados são ruidosos. Para superar essa limitação foi proposto um algoritmo eficiente para o projeto de estimador baseado no mínimo erro quadrático médio (MMSE - *minimal mean square error*). Para a detecção de falhas, às estimativas é aplicado um critério de correlação espaço-temporal. O método usa apenas as medições, sem necessidade de modelos numéricos da estrutura. Testes experimentais foram realizados em uma ponte de madeira, de escala laboratorial e permitiram a validação da técnica.

A diferenciação entre falhas de sensores, danos estruturais e variações de condições de operação foi estudada em Kullaa (2011). Variações decorrentes das condições de operação foram levadas em consideração nos conjuntos de dados de treinamento, eliminando seus efeitos sobre a detecção de falhas. Falhas de sensores foram diferenciadas de falhas estruturais levando-se em consideração o fato de que falhas de sensores são locais e falhas estruturais são globais. A estrutura de teste utilizada para a validação do método foi a mesma ponte de madeira usada em Kullaa (2010).

Em Kullaa (2013), diferentes tipos de falhas de sensores (ganho, deriva, degradação da precisão, falha completa etc.) foram detectadas a partir de método baseado no fato de que há grande redundância de informações em uma rede de sensores. A rede de sensores foi modelada como processo Gaussiano e para cada sensor foi gerada estimativa separadamente, usando-se o estimador MSSE. A falha de sensor foi identificada e quantificada usando-se o Teste da Razão de Verossimilhança Generalizada. Novamente foi usada a estrutura de madeira apresentada em Kullaa (2010) e em Kullaa (2011).

Redes Bayesianas foram investigadas em Liu e Mrad (2013) para a detecção de falhas de *strain gauges* num estrutura de placa de alumínio. Baseada na Teoria da Probabilidade Bayesiana, a Rede Bayesiana é um método baseado em conhecimento, não exige um modelo matemático do sistema, apenas avalia probabilisticamente a relação entre sensores de referência (sem falhas) e sensores alvo (possivelmente com falhas). Liu e Mrad (2013) mostraram que a qualidade da detecção de falha com a rede Bayesiana depende da alocação dos sensores e também da discretização das medições.

1.5 Estrutura da tese

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução à tese, com apresentação de alguns conceitos fundamentais, motivação e objetivos do trabalho. É apresentada também uma pequena explicação sobre a abordagem adotada para a solução do problema apresentado, além de uma breve revisão bibliográfica sobre Validação de Sensores.

O Capítulo 2 aborda os estimadores de saída usados como geradores de resíduo e apresenta a estrutura de banco de estimadores adotada para o isolamento de falhas. São descritos ainda os indicadores e as adaptações empregadas, além dos métodos de validação de sensores

presentes nos artigos de referência Abdelghani e Friswell (2007) e Kerschen *e outros* (2005).

As estruturas flexíveis do tipo placa empregadas em simulações e experimentos são descritas no Capítulo 3. Modelos no espaço de estados são apresentados, um obtido a partir do Método dos Elementos Finitos e outro a partir de identificação experimental. Controladores \mathcal{H}_∞ projetados também estão apresentados no capítulo.

Os resultados das simulações e dos testes experimentais para detecção e isolamento de falhas são apresentados no Capítulo 4. Discussões também estão nesse capítulo.

No Capítulo 5 estão conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 DETECÇÃO E ISOLAMENTO DE FALHAS

Detecção e isolamento de falhas (FDI - *Fault Detection and Isolation*) é um tema comum em áreas que envolvem sistemas de controle. A detecção é o processo de indicação da existência de falha. Já o isolamento é a precisa determinação de quais sensores, atuadores ou componentes falharam (PATTON E CHEN, 1999). Para se conduzir a detecção, uma possibilidade é gerar estimativas das saídas medidas e compará-las com medições disponíveis. A subtração entre a grandeza medida e a estimada fornece o sinal de resíduo (FRANK, 1990), que deve ser pequeno na ausência e grande na presença de falha. Indicadores podem ser usados para quantificar os resíduos (DA SILVA, 2008) e esquemas de bancos de filtros podem ser usados para isolar a falha (DING, 2008).

É necessário definir alguma estratégia para o cálculo das estimativas das saídas (FRANK; PATTON E CHEN; PATTON E CHEN; DING, 1990; 1993; 1999; 2008), uma vez que os sinais de resíduo são computados a partir desses sinais estimados. Em sistemas de controle é muito comum o uso de estimadores de saída, projetados a partir de um modelo de estados do sistema a ser controlado/monitorado. Esses estimadores oriundos da área de sistemas de controle serão usados nesse trabalho para a geração de resíduos.

2.1 Estimadores de saída

Estimadores podem ser projetados de diversas maneiras e nesse trabalho são consideradas as seguintes abordagens: observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ . Todos eles produzem uma estimativa $\hat{y}(t)$ da saída medida $y(t)$. O resíduo é $r(t) = y(t) - \hat{y}(t)$.

O sistema composto de um estimador $F(s)$ mais um módulo de comparação entre as

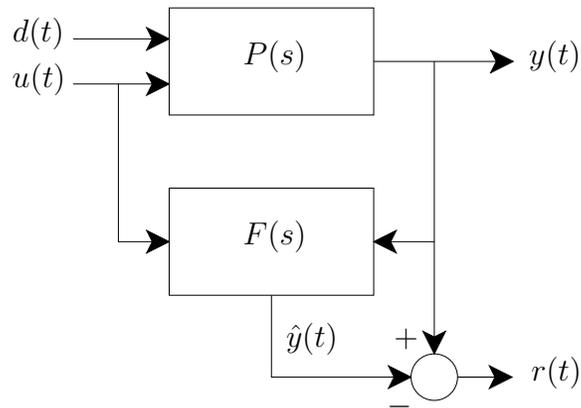


Figura 2.1: Gerador de resíduo.

saídas medidas e estimadas é chamado Gerador de Resíduo e pode ser visualizado na Figura 2.1. O sistema monitorado $P(s)$ apresentado possui dois tipos de entradas, as entradas de distúrbio $d(t)$ e as entradas de teste (no caso de SHM) ou controle (no caso de AVC) $u(t)$. Essas entradas de teste ou de controle são conhecidas, selecionadas de acordo com a técnica de monitoramento de integridade ou a estratégia de controle de vibração empregadas.

A seguir descreve-se cada um dos três tipos de estimadores de interesse dessa tese.

2.1.1 Observador de saída

O observador de saída é projetado com base em um modelo nominal da planta. A partir da entrada $u(t)$ e da saída medida $y(t)$, o observador produz uma estimativa $\hat{y}(t)$ para $y(t)$. Internamente, incorpora uma realimentação que permite corrigir erros de estimativa. Antes de apresentar a formulação, define-se a planta representada no espaço de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t),\end{aligned}$$

onde $x(t)$ é o vetor de estados e as matrizes de estado A , B , C e D são conhecidas.

O observador de saída correspondente é descrito como (ASTROM E MURRAY, 2008):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + Du(t),\end{aligned}$$

onde $\hat{x}(t)$ é a estimativa de $x(t)$ e L é uma matriz escolhida de forma a garantir que o erro de estimativa convirja assintoticamente para zero com uma velocidade a ser convenientemente definida durante o projeto. Esse é o clássico observador de Luenberger. É importante ressaltar que esse estimador não incorpora informações sobre distúrbios em sua formulação.

2.1.2 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman incorpora conhecimentos sobre os distúrbios que atuam e interferem no comportamento dinâmico do sistema (ASTROM E MURRAY; FRANKLIN e outros, 2008; 1998). Seja uma planta com entradas de distúrbio e ruído representada no espaço de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Gd(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + Hd(t) + n(t),\end{aligned}$$

onde G e H são matrizes conhecidas; $d(t)$ e $n(t)$ são distúrbios do tipo ruído branco tais que $E[d(t)] = E[n(t)] = 0$, $E[d(t)d(t)^T] = Q$, $E[n(t)n(t)^T] = R$ e $E[d(t)n(t)^T] = 0$, com $E[\cdot]$ indicando o valor esperado¹ ou esperança matemática.

¹Para uma variável aleatória contínua X com função de densidade de probabilidade $f(x)$, o valor esperado é definido por

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx.$$

O filtro de Kalman é projetado para minimizar a covariância do erro de estimativa em regime permanente, sendo essa covariância dada por

$$P = \lim_{t \rightarrow \infty} E[(x(t) - \hat{x}(t))(x(t) - \hat{x}(t))^T].$$

A solução ótima requer o seguinte filtro de Kalman (ASTROM E MURRAY, 2008):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) + Du(t).\end{aligned}$$

Nota-se que esse filtro de Kalman tem a mesma estrutura do observador de saída, diferenciando-se apenas quanto à forma de se determinar a matriz de ganhos L . Uma forma de se determinar L é (ASTROM E MURRAY, 2008):

$$L = PC^T R^{-1}$$

sendo P a solução da equação algébrica de Riccati correspondente:

$$AP + PA^T - PC^T R^{-1} CP + GQG^T = 0.$$

2.1.3 Filtro \mathcal{H}_∞

O sistema linear com função de transferência $G(s)$ esquematizado na Figura 2.2(a) é descrito no espaço de estados por:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t)$$

$$z(t) = C_1x(t) + D_{11}w(t) + D_{12}u(t)$$

$$y(t) = C_2x(t) + D_{21}w(t) + D_{22}u(t)$$

onde $w(t)$ é a entrada de distúrbios, $u(t)$ é a entrada de controle, $z(t)$ é a saída de desempenho, $y(t)$ é a saída de medição, $x(t)$ o vetor de estados e as matrizes de estado $(A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22})$ são conhecidas.

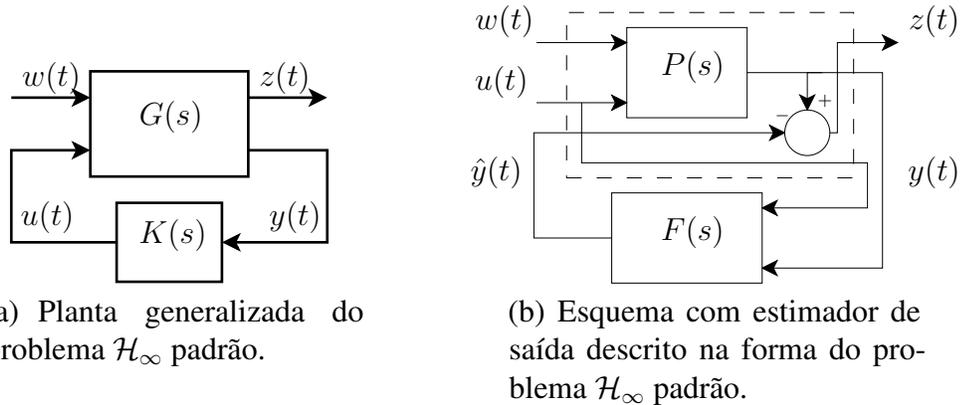


Figura 2.2: Formulação do problema \mathcal{H}_∞ .

Seja ainda $T_{zw}(s)$ a função de transferência de malha fechada do sistema da Figura 2.2(a), com entrada $w(t)$ e saída $z(t)$. O objetivo do problema \mathcal{H}_∞ é encontrar o controlador $K(s)$ que fornece sistema em malha fechada estável e que minimiza $\|T_{zw}(s)\|_\infty$, a norma \mathcal{H}_∞ de $T_{zw}(s)$ (SKOGESTAD E POSTLETHWAITE; ZHOU e outros, 1996; 1996).

O problema \mathcal{H}_∞ padrão pode ser formulado para que seja projetado um estimador de

saída, ao invés de um controlador. Observe o esquema na Figura 2.2(b), onde o filtro $F(s)$ gera a estimativa $\hat{y}(t)$ da saída medida $y(t)$. O sinal de desempenho a ser minimizado é o erro de estimativa, ou seja, $y(t) - \hat{y}(t)$. O erro de estimativa deve ser o menor possível, independentemente das entradas exógenas $w(t)$ e $u(t)$. Nesse caso, a planta generalizada é:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + \bar{B}_1\bar{w}(t) + \bar{B}_2\bar{u}(t) \\ \bar{z}(t) &= \bar{C}_1x(t) + \bar{D}_{11}\bar{w}(t) + \bar{D}_{12}\bar{u}(t) \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}_2x(t) + \bar{D}_{21}\bar{w}(t) + \bar{D}_{22}\bar{u}(t)\end{aligned}$$

com os sinais:

$$\begin{aligned}\bar{w}(t) &= \begin{bmatrix} w(t) \\ u(t) \end{bmatrix}, \quad \bar{u}(t) = \hat{y}(t), \\ \bar{z}(t) = e(t) &= y(t) - \hat{y}(t), \quad \bar{y}(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ u(t) \end{bmatrix}\end{aligned}$$

e as matrizes:

$$\begin{aligned}\bar{B}_1 &= \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_2 = [0], \quad \bar{C}_1 = C_2, \\ \bar{D}_{11} &= \begin{bmatrix} D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}, \quad \bar{D}_{12} = -I, \quad \bar{C}_2 = \begin{bmatrix} C_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \bar{D}_{21} &= \begin{bmatrix} D_{21} & D_{22} \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \bar{D}_{22} = 0,\end{aligned}$$

onde I é uma matriz identidade de dimensões convenientes.

Existem diversas maneiras de se resolver o problema \mathcal{H}_∞ : busca direta, onde o problema de otimização restrita é resolvido; solução das equações de Riccati correspondentes (ZHOU *e outros*; SKELTON *e outros*, 1996; 1997); emprego de técnicas baseadas em desigualdades matriciais lineares, conhecidas pela sigla LMI (BOYD *e outros*; SCHERER *e outros*, 1994; 1997). O desenvolvimento da teoria envolvida nessas soluções é extenso e será omitido neste

texto por fugir do escopo do trabalho. Apenas uma breve abordagem do problema sob o ponto de vista de LMI pode ser verificada no Apêndice B. Ressalta-se ainda que a solução do problema pode ser obtida a partir de pacotes computacionais disponíveis, destacando-se o *Robust Control Toolbox* do aplicativo MATLAB, que é usado neste trabalho.

2.2 Banco de estimadores

Além de detectar a presença de uma falha, é necessário também determinar em qual sensor ela ocorreu, ou seja, isolar a falha. Uma estratégia é projetar um banco de estimadores de modo que cada elemento do banco seja responsável por monitorar um sensor específico (CHEN E PATTON; DING, 1999; 2008). Uma possível estrutura desse esquema de isolamento de falhas pode ser vista na Figura 2.3, onde cada estimador F_i produz uma estimativa \hat{y}_i para a medida y_i , permitindo o monitoramento do sensor i . A saída medida deve ser comparada com as estimativas fornecidas por cada um dos estimadores do banco, gerando os sinais de resíduo.

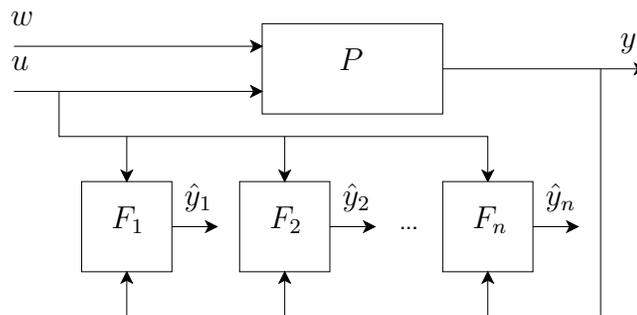


Figura 2.3: Banco de estimadores.

Existem diferentes esquemas para o banco de estimadores (DING, 2008), cada um aperfeiçoando de alguma forma a ideia geral apresentada na Figura 2.3. O Esquema de Observador Generalizado (*Generalized Observer Scheme* - GOS) foi escolhido para o projeto do banco nessa tese. No GOS, cada estimador do banco é projetado para monitorar um sensor em particular. Cada estimador recebe como entradas, além do sinal de controle, o conjunto de todas as saídas

medidas, exceto a saída proveniente do sensor monitorado. Então esse estimador produz estimativas para todas as saídas do sistema, exceto aquela relativa ao sensor monitorado. A diferença entre medidas e estimativas gera o sinal de resíduo. Haverá assim um resíduo para cada elemento do banco, cada um responsável por monitorar um sensor em particular.

A vantagem desse esquema é o fato de gerar resíduos não corrompidos pela medida fornecida pelo sensor com falha. Resíduos aproximadamente nulos indicam que o conjunto de saídas medidas é igual ao valor previsto pelas estimativas, ou seja, não há sensores com falha no grupo e, portanto, a eventual falha só pode estar no sensor sob monitoramento.

No caso de falhas simultâneas, cada elemento do banco de estimadores monitora um grupo de sensores. Por exemplo, para monitorar falhas simultâneas em dois sensores, cada estimador do banco recebe como entrada, além do sinal de controle, o conjunto de todos os sinais medidos, exceto aqueles provenientes dos dois sensores monitorados, e produz estimativas de todas as saídas, exceto aquelas relativas aos dois sensores monitorados.

Para formalizar esse procedimento, considere o monitoramento de falhas não simultâneas e um vetor com n_y sinais medidos representado por $y(t) = [y_1(t) \dots y_{n_y}(t)]^T$. A seguinte notação é introduzida:

$$y_{\underline{i}}(t) = \left[y_1(t) \dots y_{i-1}(t) \quad y_{i+1}(t) \dots y_{n_y}(t) \right]^T \quad (2.1)$$

onde $y_{\underline{i}}(t)$, dimensão $(n_y - 1) \times 1$, é o vetor de medidas sem a medida $y_i(t)$, com $i = 1 \dots n_y$.

Usando essa notação, cada estimador F_i do banco GOS produz uma estimativa $\hat{y}_{\underline{i}}(t)$. Então, é possível construir o resíduo $r(t) = [r_1(t) \dots r_{n_y}(t)]^T$ com $r_i(t) = y_{\underline{i}}(t) - \hat{y}_{\underline{i}}(t)$. Cada elemento $r_i(t)$ tem dimensão $(n_y - 1) \times 1$ e $r(t)$ tem dimensão $(n_y - 1)n_y \times 1$, ou seja, o resíduo $r_i(t)$ usado para monitorar o sensor i tem dimensão $n_y - 1$.

2.2.1 Trabalhando com dados discretos

Quando se trabalha com dados discretos, tomando-se uma amostra de tempo k o sinal $y_{\underline{i}}(t)$ torna-se $y_{\underline{i}}(k)$ e pode ser descrito por

$$y_{\underline{i}}(k) = y_{\underline{i},k} = \left[y_1(k) \quad \dots \quad y_{i-1}(k) \quad y_{i+1}(k) \quad \dots \quad y_{n_y}(k) \right]^T \quad (2.2)$$

de modo que $y_{\underline{i},k}$ é um vetor de dimensão $(n_y - 1) \times 1$ e o acesso ao j -ésimo elemento do vetor pode ser representado por $y_{\underline{i},k}(j)$. A mesma notação pode ser aplicada ao sinal estimado $\hat{y}_{\underline{i}}(t)$ levando a $\hat{y}_{\underline{i},k}$. Note que o sensor monitorado é excluído do conjunto de dados e, consequentemente, dados corrompidos não serão usados na tomada de decisão.

Seguindo essa mesma notação, o resíduo $r_i(t)$ em uma amostra k é $r_i(k)$ e pode ser construído fazendo-se

$$r_i(k) = r_{i,k} = y_{\underline{i},k} - \hat{y}_{\underline{i},k}, \quad (2.3)$$

sendo $r_{i,k}$ um vetor de dimensão $(n_y - 1) \times 1$ e o acesso à j -ésima linha desse vetor pode ser representado por $r_{i,k}(j)$. Aqui é importante lembrar que para monitorar um dado sensor i está sendo construído um vetor de resíduo de dimensão $n_y - 1$ e que posteriormente deverá ser analisado de forma quantitativa.

Medindo-se um total de M amostras de tempo ($k = 1, \dots, M$), o cômputo de $r_i(t)$ levará à matriz

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,M} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n_y,1} & r_{n_y,2} & \dots & r_{n_y,M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}_1 \\ \mathcal{R}_2 \\ \vdots \\ \mathcal{R}_{n_y} \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

sendo \mathcal{R} uma matriz de dimensão $(n_y - 1)n_y \times M$ e \mathcal{R}_i uma matriz de dimensão $(n_y - 1) \times M$. Nesse caso, \mathcal{R}_i seria o resíduo relativo ao sensor i .

2.2.2 Indicadores adaptados - proposta

O sinal medido i não é levado em consideração na determinação de $\hat{y}_{\underline{i}}(t)$, de modo que $\hat{y}_{\underline{i}}(t)$ deve ser aproximadamente igual a $y_{\underline{i}}(t)$ quando a falha estiver no sensor i . Isso significa que o elemento do banco de filtros que produz estimativa $\hat{y}_{\underline{i}}(t)$ mais próxima da saída medida $y_{\underline{i}}(t)$ permite o isolamento da falha, ou seja, o menor resíduo $r_i(t)$ permite o isolamento da falha. Entretanto, é necessário adotar uma métrica para comparar os resíduos e determinar qual é o menor. Com esse propósito, foram selecionados quatro indicadores: Diferença RMS (*Root Mean Square*), Soma do Módulo do Erro, Soma Quadrática do Erro e *Modal Assurance Criterion*.

Cada um desses indicadores é capaz de gerar uma grandeza escalar associada a um vetor de dados. Entretanto, trabalhando-se com um conjunto de medições ao longo do tempo, cada elemento do banco de estimadores produzirá um resíduo \mathcal{R}_i (Equação 2.4), que é uma matriz. Assim, a fim de gerar uma grandeza escalar associada ao resíduo \mathcal{R}_i é necessário aplicar uma redução dimensional além daquela propiciada pelos indicadores sugeridos. Essa segunda redução dimensional será obtida calculando-se a norma euclidiana do vetor obtido após a aplicação do indicador clássico. No caso específico do indicador MAC, a segunda redução dimensional será obtida fazendo-se a soma dos elementos do vetor obtido após a aplicação do indicador clássico. A seguir, são definidos cada um desses indicadores.

- (i) Diferença RMS (DRMS). Primeiramente é definido o escalar $\eta_{i,k}$ que representa a diferença entre os valores RMS² das saídas medidas e estimadas:

$$\eta_{i,k} = r_{i,k}^{\text{RMS}} = y_{\underline{i},k}^{\text{RMS}} - \hat{y}_{\underline{i},k}^{\text{RMS}} \quad (2.5)$$

²O valor RMS para um conjunto de N valores $\{x_1, \dots, x_N\}$ é dado por $x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$.

permitindo a construção do vetor

$$\eta_i = \begin{bmatrix} \eta_{i,1} & \eta_{i,2} & \dots & \eta_{i,M} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

com dimensão $1 \times M$. Esse vetor η_i ainda precisa ser reduzido a uma grandeza escalar.

Com o objetivo de promover uma nova redução dimensional e obter uma grandeza escalar que quantifica o resíduo para um dado sensor, propõe-se o indicador DRMS adaptado definido para cada sensor i como a norma euclidiana do vetor η_i :

$$\text{DRMS}_i = \sqrt{(\eta_{i,1})^2 + (\eta_{i,2})^2 + \dots + (\eta_{i,M})^2}. \quad (2.7)$$

- (ii) Soma do Módulo do Erro (SME). Define-se o escalar $\beta_{i,k}$, que é a soma do módulo do resíduo $r_{i,k}$:

$$\beta_{i,k} = \sum_{j=1}^{n_y-1} |r_{i,k}(j)|, \quad (2.8)$$

permitindo a construção do vetor

$$\beta_i = \begin{bmatrix} \beta_{i,1} & \beta_{i,2} & \dots & \beta_{i,M} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

com dimensão $1 \times M$.

A fim de uma nova redução dimensional, propõe-se o indicador SME adaptado definido para o sensor i como a norma euclidiana do vetor β_i :

$$\text{SMR}_i = \sqrt{(\beta_{i,1})^2 + (\beta_{i,2})^2 + \dots + (\beta_{i,M})^2}. \quad (2.10)$$

- (iii) Soma do Erro ao Quadrado (SEQ). Define-se o escalar $\alpha_{i,k}$ que representa a soma quadrática do resíduo $r_{i,k}$:

$$\alpha_{i,k} = \sum_{j=1}^{n_y-1} r_{i,k}^2(j), \quad (2.11)$$

permitindo a construção do vetor

$$\alpha_i = \begin{bmatrix} \alpha_{i,1} & \alpha_{i,2} & \dots & \alpha_{i,M} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

com dimensão $1 \times M$.

Para nova redução dimensional, propõe-se o indicador SQE adaptado definido para o sensor i como a norma euclidiana do vetor α_i :

$$\text{QSR}_i = \sqrt{(\alpha_{i,1})^2 + (\alpha_{i,2})^2 + \dots + (\alpha_{i,M})^2}. \quad (2.13)$$

(iv) Modal assurance criterion (MAC). Para o sensor monitorado i , o MAC adaptado entre y_i e \hat{y}_i é:

$$\text{MAC}_i = \sum_{j=1}^{n_y-1} \left\{ \frac{[\hat{y}_i^j (y_i^j)^T]^2}{[y_i^j (y_i^j)^T] [\hat{y}_i^j (\hat{y}_i^j)^T]} \right\}, \quad (2.14)$$

onde o somatório tem o papel de promover a redução dimensional adicional.

Esse indicador MAC é o mesmo muito utilizado em Análise Modal para comparar formas modais de dados e de modelos identificados (ALLEMANG, 2003).

2.2.3 Consideração importante

Os indicadores a serem de fato utilizados serão as razões entre os indicadores calculados na ausência de falhas e os indicadores calculados para os dados sob monitoramento. Dessa forma, quando o sensor monitorado i apresentar uma falha, os indicadores DRMS_i , SME_i , SEQ_i e MAC_i terão valor unitário. Isso ocorre porque para monitorar o sensor i os dados relativos a

esse sensor são retirados do conjunto e, portanto, os dados remanescentes ficam muito “parecidos” com os dados saudáveis. Isso quer dizer que quando o sensor i é retirado do conjunto de dados, esses dados tornam-se equivalentes àqueles da condição sem falha e, portanto, a falha só pode estar nele.

2.2.4 Reescalamiento dos indicadores

Para que os indicadores sejam apresentados de forma a ressaltar as diferenças de valores e conseqüentemente facilitar a determinação, via inspeção visual, daqueles que estão mais próximos do valor unitário, é proposto o artifício do reescalamiento. Aqui adota-se o seguinte reescalamiento: normalizam-se os indicadores pelo indicador que apresenta menor distância para o valor unitário e toma-se o inverso desse valor normalizado. Dessa forma, o indicador com valor mais próximo de um passará a valer um e o indicador com valor mais distante de um ficará ainda mais distante de um. Na apresentação dos resultados dessa tese ficará mais clara a utilidade desse reescalamiento.

A seguir, define-se matematicamente como é realizado esse reescalamiento. Considere o indicador $DRMS = [DRMS_1 \dots DRMS_{n_y}]$, sendo $DRMS_i$ o indicador calculado para o sensor i num total de n_y sensores. A distância de $DRMS_i$ para o valor unitário é dada por:

$$d_i = |1 - DRMS_i|. \quad (2.15)$$

É possível construir um vetor d contendo as distâncias de cada indicador $DRMS_i$ até o valor unitário, de modo que $d = [d_1 \dots d_{n_y}]$. Com isso, o indicador reescalado será:

$$\overline{DRMS}_i = \frac{\min d}{d_i}, \quad (2.16)$$

onde $\min d$ representa o valor mínimo de d .

2.2.5 Indicador Produto

Em alguns casos os indicadores podem fracassar na tarefa de isolamento de falha, o que de fato foi constatado durante o desenvolvimento dessa tese. Foi observado ainda que os indicadores fracassam de formas diferentes. Para superar essa limitação dos indicadores propõe-se um novo indicador, denominado Indicador Produto e definido, para o sensor i , pelo produto dos indicadores $DRMS_i$, SME_i e SEQ_i :

$$I_{P_i} = \overline{DRMS}_i \times \overline{SME}_i \times \overline{SEQ}_i, \quad (2.17)$$

sendo \overline{DRMS} , \overline{SME} e \overline{SEQ} as versões reescaladas dos indicadores $DRMS$, SME e SEQ , respectivamente. Desse modo, o Indicador Produto terá valores tais que $0 < I_{P_i} \leq 1$.

Mesmo que um dos indicadores fracasse, o indicador proposto pode ter sucesso, apenas com o inconveniente de o valor máximo (aquele que isola a falha e que idealmente assume valor unitário) ficar um pouco abaixo do limite superior.

2.3 Métodos de referência

2.3.1 Método de Abdelghani

Usando a abordagem de filtragem modal, a referência Abdelghani e Friswell (2007) propõe geradores de resíduos para isolar falhas de sensores. O método requer um modelo modal

da estrutura monitorada para estimar as saídas do sistema. A partir dessa estimativa, dois sinais de resíduos são gerados para cada sensor monitorado, o primeiro considerando que todos os sensores estão funcionando corretamente e o segundo considerando que o sensor monitorado, somente ele, está com falha. A diferença entre esses dois resíduos produz um outro resíduo, caracterizando a contribuição do trabalho de Abdelghani e Friswell (2007). A seguir descreve-se o método.

A resposta temporal $Y(t)$ de uma estrutura flexível pode ser escrita em termos de seus n modos:

$$Y_t = Y(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i q_i(t) = \Phi q(t) = \Phi q_t \quad (2.18)$$

onde $\Phi = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_n \end{bmatrix}$ é a matriz modal medida e $q_t = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & \dots & q_n \end{bmatrix}^T$ é o vetor de coordenadas modais.

Assumindo-se nenhuma falha de sensor, a saída Y_t pode ser estimada por:

$$\hat{Y}_t^0 = \Phi \Phi^\dagger Y_t \quad (2.19)$$

onde o símbolo $(\cdot)^\dagger$ significa pseudoinversa e $(\cdot)^0$ denota que a estimativa é obtida admitindo-se ausência de falha de sensor.

Considera-se agora que o sensor j apresenta uma falha e faz-se a seguinte partição:

$$Y_t = \begin{bmatrix} Y_t^j \\ Y_t^{\bar{j}} \end{bmatrix}, \quad \hat{Y}_t^0 = \begin{bmatrix} \hat{Y}_t^{0(j)} \\ \hat{Y}_t^{0(\bar{j})} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

onde o subscrito j refere-se à resposta no j -ésimo sensor, candidato a ter falha, e \bar{j} refere-se às respostas nos sensores sem falha.

A matriz modal também é particionada seguindo a mesma lógica:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi^j \\ \Phi^{\bar{j}} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Assim, uma estimativa da saída nos sensores sem falha é:

$$\hat{Y}_t^{\bar{j}} = \Phi^{\bar{j}}(\Phi^{\bar{j}})^\dagger Y_t^{\bar{j}}. \quad (2.22)$$

Levando-se em consideração as definições anteriores, são usualmente adotados os seguintes resíduos:

$$\gamma_j^0 = \hat{Y}_t^{0(j)} - Y_t^{\bar{j}}, \quad (2.23)$$

$$\gamma_j = \hat{Y}_t^{\bar{j}} - Y_t^{\bar{j}}, \quad (2.24)$$

onde $j = 1, \dots, r$, sendo r o número de sensores. Note que γ_j^0 é calculado baseando-se na hipótese de que todos os sensores estão funcionando corretamente, enquanto γ_j é calculado com base na consideração de que apenas o j -ésimo sensor tem falha.

A partir desses resíduos, o artigo de Abdelghani e Friswell (2007) adota um índice de correlação para isolamento de falhas:

$$\rho_j = \frac{E[\zeta_j^T \gamma_j^0]}{\sqrt{E[\|\zeta_j\|^2]}} \quad (2.25)$$

onde $\zeta_j = \gamma_j^0 - \gamma_j$. Note que há um índice para cada sensor monitorado.

O índice de correlação deve ser computado para o sistema saudável e seu valor armazenado. Então, a razão entre esse índice armazenado e o índice calculado para o sistema

correntemente monitorado fornece o indicador do método de Abdelghani e Friswell (2007):

$$AF_j = \frac{\rho_j^h}{\rho_j} \quad (2.26)$$

onde ρ_j^h é o índice de correlação calculado para o sistema saudável e ρ_j é o índice calculado para o sistema corrente. O sobrescrito j refere-se ao j -ésimo sensor.

O indicador com valor igual a 1 revela falha no sensor por ele monitorado. Para o isolamento de falhas simultâneas, durante o cômputo dos resíduos é necessário incluir combinações de conjuntos de sensores hipoteticamente com falha. Por exemplo, combinações 2 a 2 para falhas em 2 sensores simultaneamente.

2.3.2 Método de Kerschen

A referência Kerschen *e outros* (2005) apresenta um método de detecção de falhas de sensores baseado na Análise dos Componentes Principais (PCA - *Principal Component Analysis*). O método toma o subespaço gerado pelo conjunto de dados medidos e o compara com o subespaço gerado por um conjunto de dados sem falhas. Os ângulos principais entre esses subespaços são utilizados para proceder a comparação de forma quantitativa. A seguir abordam-se brevemente conceitos fundamentais de PCA.

Seja a resposta de um sistema representada por um vetor y de dimensão n_S . Considere que m medições de y são colocadas numa matriz Y (n_S linhas e m colunas). A decomposição em valores singulares de Y é definida como:

$$Y = USV^T = \begin{bmatrix} u_1 & \dots & u_{n_S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(t_1) & \dots & a_1(t_m) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n_S}(t_1) & \dots & a_{n_S}(t_m) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

onde U é uma matriz ortonormal de dimensão $n_S \times n_S$ que contém os vetores singulares à esquerda; S é uma matriz pseudodiagonal e semipositivo definida, de dimensão $n_S \times m$, sendo que os elementos de sua diagonal são os valores singulares; V é uma matriz ortonormal de dimensão $m \times m$ que contém os vetores singulares à direita. As colunas u_i da matriz U são as direções principais e $a_i(t)$ são seus correspondentes coeficientes temporais ponderados pelos valores singulares. Uma redução de dimensionalidade pode ser obtida retirando-se do conjunto de direções principais aquelas associadas a valores singulares muito pequenos.

As direções principais formam a base de um subespaço no qual está contida a resposta do sistema. Conforme já mencionado, o método de Kerschen *e outros* (2005) detecta falhas de sensores a partir da avaliação do ângulo entre o subespaço saudável e o subespaço monitorado. Ângulo nulo indica que os subespaços são os mesmos, ou seja, o sistema monitorado é igual ao sistema saudável de referência e portanto não há falha. Ângulos diferentes de zero indicam presença de falha. Nessa tese é utilizada a rotina *subspace.m* disponível no MATLAB para o cômputo desses ângulos.

Ainda no trabalho de Kerschen *e outros* (2005), o conjunto de dados saudáveis de referência é dividido em blocos. Os ângulos principais entre os subespaços gerados por cada bloco e o subespaço gerado pelo conjunto de dados saudáveis completo é calculado, o que fornece uma coleção de diferentes valores de ângulos. Um Limite Superior de Controle (UCL - *Upper Control Limit*) é definido como sendo o valor médio dos ângulos somado ao desvio padrão desses ângulos. Uma estrutura a ser monitorada deve ter seu UCL previamente calculado.

Os dados sob monitoramento também são particionados em blocos e são calculados os ângulos principais entre o subespaço gerado por cada bloco e o subespaço saudável. Uma falha é detectada quando o ângulo calculado supera o UCL. Para isolar a falha, os sensores são retirados um a um dos conjuntos de dados, tanto os dados de referência quanto os dados correntes, e os

ângulos são recalculados. O ângulo é mínimo quando o sensor retirado é aquele com falha.

Estabelecido o procedimento de detecção e isolamento de falhas de Kerschen *e outros* (2005), nota-se que ainda há um problema: avaliar o vetor de ângulos principais resultante e indicar se ele é pequeno ou grande, mínimo ou máximo. Para dar suporte a essa decisão, propõe-se nessa tese o uso de um indicador, tomando-se o cuidado de o definir de forma a permitir a comparação com os demais métodos sob análise.

O indicador adotado é a razão entre a norma euclidiana do vetor de ângulos calculados para os dados de referência e o vetor de ângulos calculados para os dados correntes. Para cada sensor monitorado é calculado um indicador retirando-se os dados desse sensor da análise. Dito isso, o indicador é:

$$\text{KBGW}_i = \frac{\|\theta_i^h\|_2}{\|\theta_i\|_2} \quad (2.28)$$

onde o sobrescrito h é relativo à condição saudável, o subscrito i é relativo ao i -ésimo sensor e θ é o ângulo principal entre subespaços.

O indicador com valor próximo de 1 indica que o sensor excluído da análise fez os dados correntes ficarem parecidos com os dados saudáveis de referência, portanto esse sensor apresenta falha. Indicadores diferentes de 1 indicam que dados monitorados e dados de referência são diferentes, há algum sensor com falha nos dados monitorados.

No caso de falhas simultâneas, é necessário calcular o indicador retirando combinações de sensores da análise.

3 ESTRUTURA DE PLACA

Duas diferentes estruturas flexíveis do tipo placa foram utilizadas para a avaliação do comportamento em malha fechada das técnicas de detecção e isolamento de falhas de sensores. A primeira estrutura de placa adotada foi um modelo matemático descrito no espaço de estados a partir do Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse modelo foi usado no desenvolvimento do método de detecção de falhas e também na implementação dos métodos selecionados na literatura, ou seja, método de Abdelghani e Friswell (2007) e método de Kerschen *e outros* (2005). A segunda estrutura de placa empregada foi uma placa disponível em bancada de testes localizada no Departamento de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Um modelo matemático dessa placa, obtido da identificação experimental, foi utilizado para o projeto de controladores e detectores de falhas, que posteriormente foram testados na bancada.

3.1 Placa modelada pelo Método dos Elementos Finitos

O MEF foi usado para a modelagem de uma placa de alumínio com condição de contorno definida livre-livre. Aplicou-se a abordagem apresentada em Ferreira (2009), onde a formulação de Mindlin é adotada e códigos MATLAB são disponibilizados para a obtenção das matrizes de massa e rigidez da estrutura. Esses códigos foram utilizados nessa tese seguindo a mesma abordagem para o controle de vibração empregada em Mazoni *e outros* (2011).

O banco de estimadores, técnica de detecção e isolamento de falhas de sensores tratada nessa tese, requer um modelo no espaço de estados do sistema sob análise. O modelo no espaço de estados pode ser obtido a partir das matrizes de massa e rigidez oriundas do MEF, além de conveniente matriz de amortecimento (GAWRONSKI, 2004). Nessa tese, foi atribuído amorteci-

mento modal (GAWRONSKI, 2004), sendo o fator de amortecimento modal fixado em 0,001 para todos os modos de vibração da estrutura. Essa é uma escolha arbitrária, mas dentro das faixas usuais.

Além das matrizes de massa, amortecimento e rigidez, é necessário conhecer os graus de liberdade da malha de elementos finitos para que seja possível descrever as entradas e saídas do modelo no espaço de estados.

3.1.1 Modelo de elementos finitos

A malha de elementos finitos gerada pode ser visualizada na Figura 3.1, onde os números representam os nós dos elementos finitos quadrangulares e os símbolos S e A são uma referência, respectivamente, a sensor e a atuador. Note que são 8 sensores e 1 atuador, ou seja, 8 saídas e 1 entrada. Conforme apresentado na Figura 3.2, os graus de liberdade de cada elemento finito são os deslocamentos angulares θ_x e θ_y , ao redor dos eixos ξ e η , e o deslocamento linear v , perpendicular ao plano $\xi\eta$. A essa placa de alumínio foram atribuídas as propriedades e dimensões listadas na Tabela 3.1(a), resultando nas frequências naturais apresentadas na Tabela 3.1(b).

Tabela 3.1: Propriedades, dimensões e frequências naturais da placa.

(a) Propriedades e dimensões.		(b) Frequências naturais - MEF.
Grandeza	Valor	Frequências naturais [Hz]
Altura	1,0 [m]	36,30
Largura	1,0 [m]	53,24
Espessura	2,0 [mm]	73,14
Densidade	2710 [kg/m ³]	89,58
Coefficiente de Poisson	0,33	101,15
Módulo de Young	70 [GPa]	

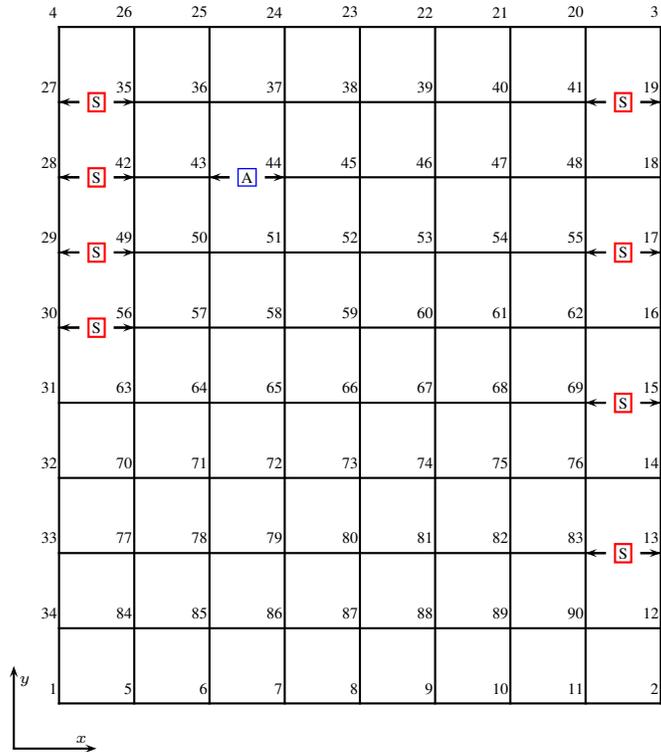


Figura 3.1: Malha de elementos finitos com as posições dos sensores (S) e atuadores (A).

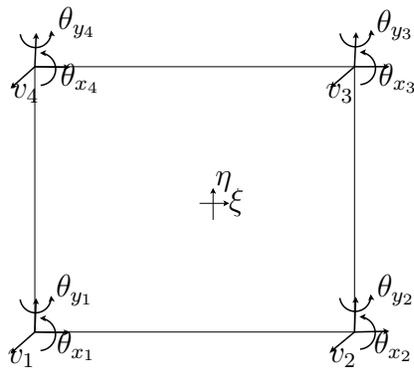


Figura 3.2: Elemento finito quadrangular de placa e graus de liberdade.

3.1.2 Modelo dos sensores e atuadores

Cada sensor/atuador é considerado como uma tira de material piezelétrico, colada ao longo do eixo x , ligando dois nós consecutivos da malha de elementos finitos da Figura 3.1. Para simplificação, efeitos da colagem são desconsiderados. Os sensores/atuadores interagem com os graus de liberdade de cada nó da malha de elementos finitos da forma esquematizada na Figura 3.3.

No caso dos sensores, a deformação da placa produz no material piezelétrico um sinal de tensão que é proporcional à soma dos deslocamentos angulares dos nós acoplados a esse sensor. Note que esses deslocamentos angulares dos dois nós são de sentidos opostos. Toma-se como exemplo o sensor alocado entre os nós 27 e 35. Nesse sensor será produzido um sinal de tensão V_s proporcional à diferença $(\theta_{y_{35}} - \theta_{y_{27}})$.

No caso do atuador, o sinal de tensão aplicado no material piezelétrico o deforma e gera momentos, em sentidos opostos, nos dois nós acoplados a esse atuador. Dessa forma, o atuador entre os nós 43 e 44, por exemplo, é submetido a um sinal de tensão V_a e produz momentos M_{43} e M_{44} tais que V_a é proporcional à diferença $(M_{43} - M_{44})$.

A escolha das localidades do atuador e dos sensores apresentadas na Figura 3.1 foi realizada fixando-se a posição do atuador, calculando-se as funções de transferência para todas as possíveis localizações dos sensores e impondo-se como saídas as localidades cujas funções de transferência forneceram as maiores normas \mathcal{H}_∞ . Dessa forma os sensores são alocados nas posições com as maiores amplitudes de vibração. Ressalta-se que a tira piezelétrica foi considerada sempre ao longo do eixo x .

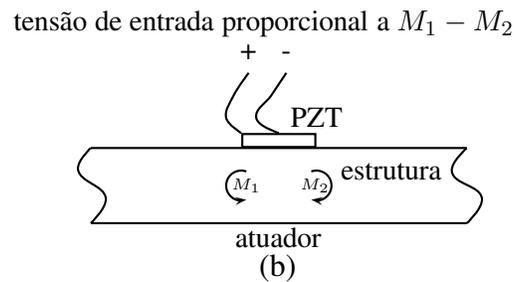
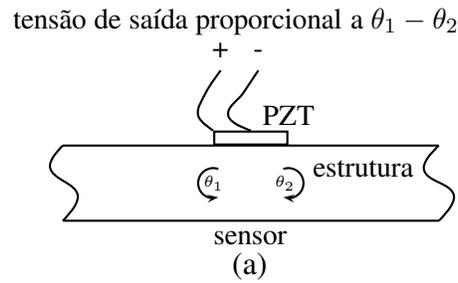


Figura 3.3: Interação entre estrutura e elementos piezelétricos.

3.1.3 Modelo no espaço de estados

O modelo no espaço de estados da placa, obtido a partir das matrizes de massa, amortecimento e rigidez, é de ordem relativamente elevada devido à discretização adotada para a malha de elementos finitos, com 90 nós e 270 graus de liberdade. Os métodos computacionais para projeto de controladores podem apresentar problemas de convergência quando aplicados a modelos de ordem elevada. Por isso, é conveniente projetar controladores a partir de modelos de ordem reduzida. Além disso, usualmente o controle de vibração visa à atenuação em modos específicos, de tal forma que a ordem pode ser reduzida por meio de um truncamento modal, originando modelo reduzido que contém apenas os modos cuja vibração se deseja atenuar. Nesse sentido, impôs-se um truncamento tal que foram eliminados os modos de corpo rígido e foram considerados apenas os cinco primeiros modos da estrutura, ou seja, baixas frequências. Esse truncamento modal levou a um modelo de estados de ordem dez, com uma entrada e oito saídas.

3.1.4 Controlador

Um controlador \mathcal{H}_∞ foi projetado para atenuar a vibração dessa estrutura flexível. A vibração é originada por um sinal de distúrbio atuando no sistema, inserido de forma a somar-se ao sinal de controle. O controlador \mathcal{H}_∞ deve minimizar o efeito desse sinal de distúrbio sobre um certo sinal de desempenho (esse sinal de desempenho é uma idealização matemática, não necessariamente uma variável física), ou seja, minimizar a norma \mathcal{H}_∞ da função de transferência entre o distúrbio w e o desempenho z . Os desempenhos adotados foram o deslocamento v_{49} do nó 49, uma variável não medida e que pode ser acessada apenas em simulação, e também o sinal de controle u , de tal forma que $z = [v_{49} \ u]^T = [z_1 \ z_2]^T$.

O nó 49 está localizado próximo do atuador, acoplado a um dos sensores e, além disso, tem função de transferência com elevada norma \mathcal{H}_∞ . Assim, a escolha de v_{49} como desempenho gera um problema de controle de resolução relativamente fácil. Já a escolha do sinal de controle u como desempenho tem como objetivo garantir que o esforço de controle seja ótimo em regiões de interesse (ZHOU e outros, 1996). Esse sistema de controle tem uma entrada de controle u , uma entrada de distúrbio w , duas saídas de desempenho z e oito saídas de medição y .

Ao sinal de desempenho são aplicadas funções de ponderação para: 1) garantir que a amplitude do esforço de controle seja mínima fora da faixa de frequências do modelo, evitando a excitação de modos não modelados, fenômeno chamado *spillover*; 2) garantir que a amplitude máxima de vibração seja mínima dentro da faixa de frequências do modelo. Dito isso e sabendo-se que a placa é um sistema mecânico modelado em uma faixa que pode ser considerada como de baixas frequências, as funções de ponderação adotadas são aquelas descritas na Tabela 3.2, projetadas conforme recomendado em Zhou e outros (1996). Descrição conceitual mais detalhada dos filtros de ponderação pode ser verificada no Apêndice C.

Tabela 3.2: Filtros de ponderação para o projeto do controlador. g : ganho na banda de rejeição; G : ganho na banda de passagem; ω_c : frequência de corte em [Hz].

Filtro	g	G	ω_c	ordem	tipo
$W_{z_1}^c$	0,001	10	159,15	1	passa-baixa
$W_{z_2}^c$	0,001	10	159,15	1	passa-alta

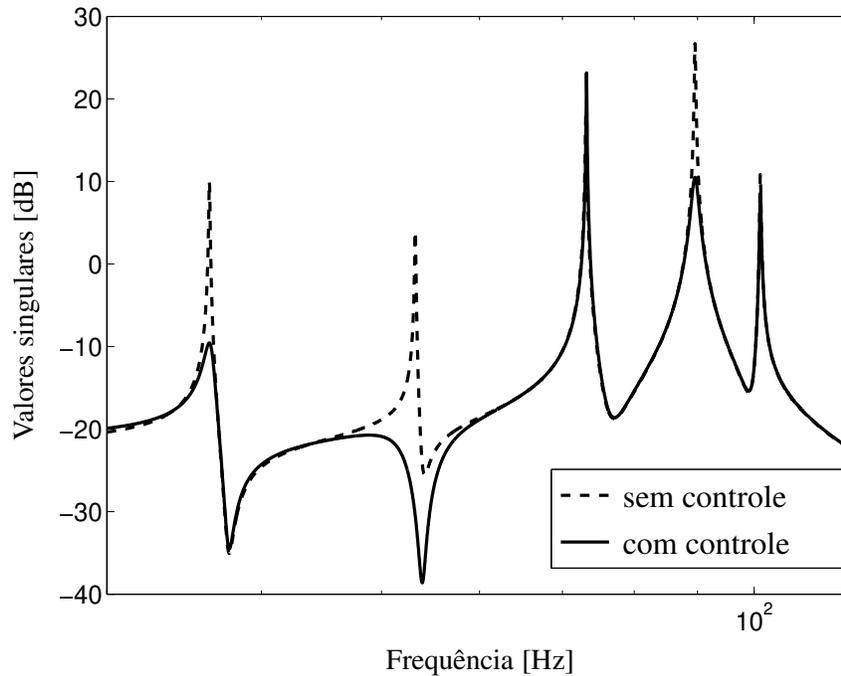


Figura 3.4: Diagrama de valores singulares dos sistemas com e sem controle.

A atenuação da vibração nos modos de baixa frequência pode ser verificada na Figura 3.4, onde são comparados os diagramas de valores singulares das malhas aberta e fechada. Os valores singulares generalizam o conceito de resposta em frequência para o caso de sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

3.2 Placa experimental

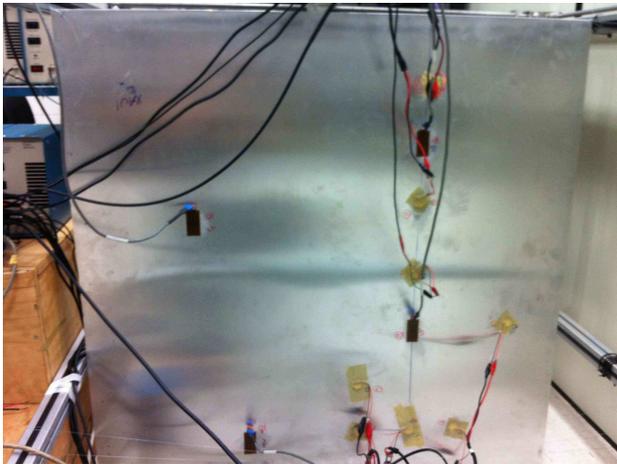
3.2.1 Estrutura física e instrumentação

Para a realização de experimentos foi utilizada uma placa de alumínio de dimensões $1,000 \times 1,000 \times 0,002$ [m], instrumentada com quatro atuadores e oito sensores piezelétricos (Figura 3.5). A placa foi pendurada com fios de náilon, caracterizando uma estrutura com condições de contorno livre-livre. O sensor é um cápsula piezelétrica (Figura 3.6(a)) de baixo custo, comumente encontrada em *buzzers*, com 20 [mm] de diâmetro e alimentação em tensão na faixa de 3 – 30 [V]. O atuador é um encapsulamento piezelétrico (Figura 3.6(b)) modelo QuickPack QP10N do fabricante *Active Control eXperts - ACX*¹, de dimensões $2,000 \times 1,000 \times 0,015$ [in] e alimentação em tensão na faixa de ± 200 [V]. Os atuadores foram colados com resina epóxi e os sensores colados com mel. A colagem com mel é de grande praticidade porque simplifica muito o processo de descolagem para eventuais trocas de posição de sensores ou para substituição de sensores com defeitos. Entretanto o uso do mel exige que os testes sejam realizados em curto período de tempo porque provoca oxidação dos sensores e deterioração das propriedades piezelétricas.

Uma descrição esquemática com numeração dos sensores e atuadores pode ser verificada na Figura 3.7. O posicionamento dos sensores e atuadores não foi estudado. A placa já estava instrumentada para outro teste em andamento no laboratório do Departamento de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Foi mantida a configuração já disponível.

Um sistema de aquisição de dados da fabricante dSPACE, modelo DS 1104, foi uti-

¹Hoje a empresa se chama *Midé Technology Corporation*.

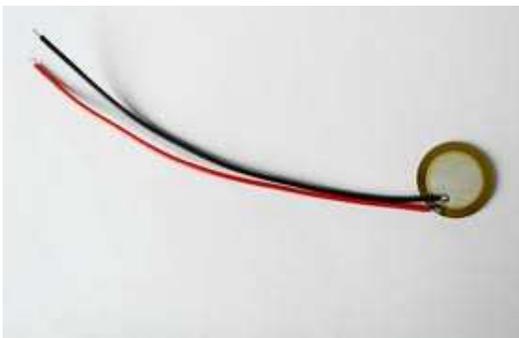


(a) Frente.

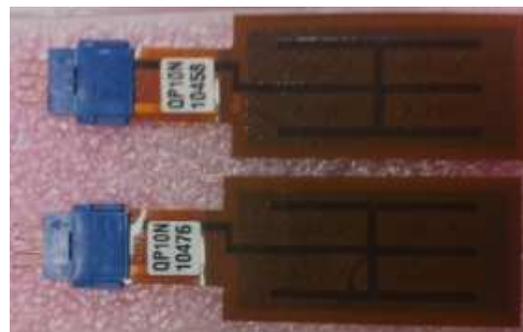


(b) Verso.

Figura 3.5: Placa experimental.



(a) Sensor.



(b) Atuador.

Figura 3.6: Sensor e atuador piezelétricos.

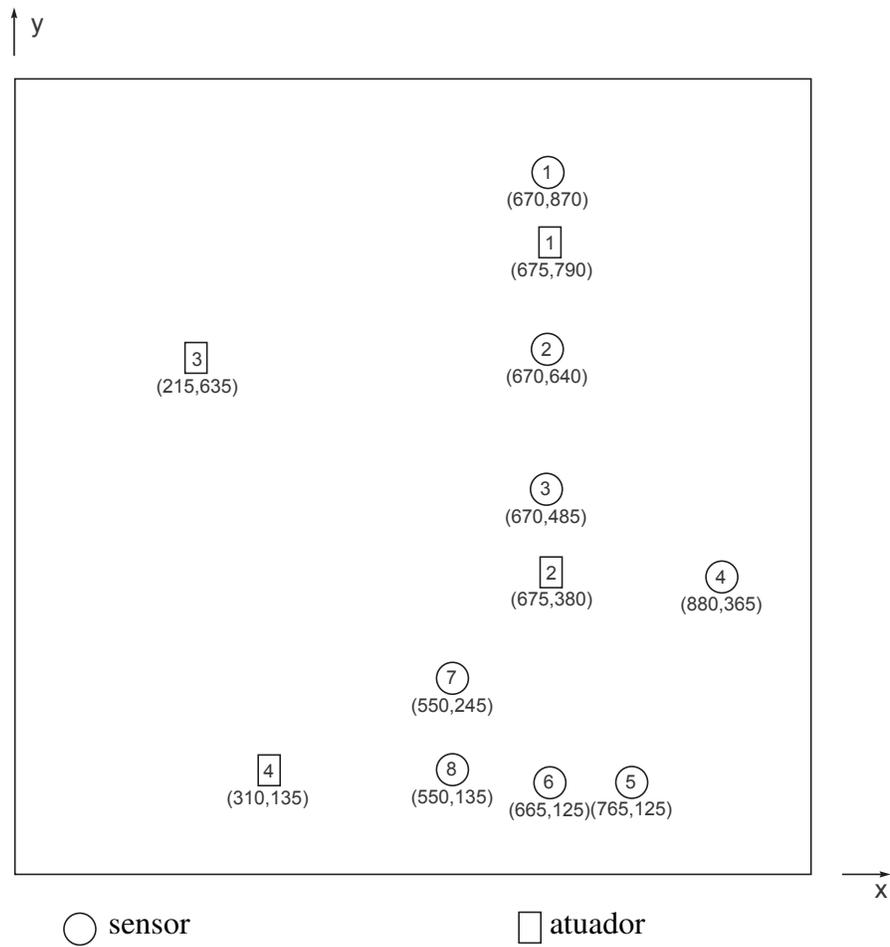


Figura 3.7: Descrição esquemática da placa com sensores e atuadores.

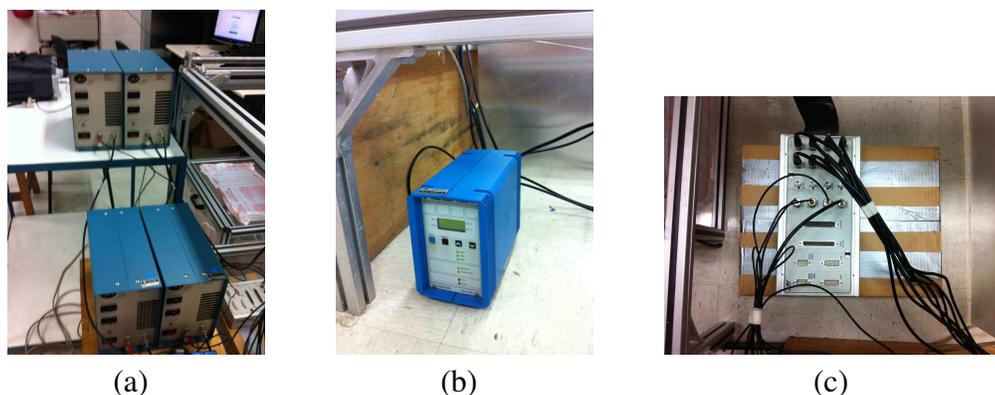


Figura 3.8: Amplificadores, condicionador de sinais e painel de conexões de entrada/saída do sistema de aquisição de dados.

lizado para a implementação digital de um controlador de vibração e também para o armazenamento dos sinais de entrada e saída usados na detecção de falhas de sensores. O sistema dSPACE tem software específico para configuração de canais de entrada e saída, além de bibliotecas MATLAB/SIMULINK para a programação do controle em tempo real.

Os sinais a serem enviados para os atuadores precisam ser amplificados. Para isso foram usados quatro amplificadores de potência (Figura 3.8(a)) fornecidos pela ACX em conjunto com os quatro atuadores QuickPack QP10N. Os sinais medidos pelos sensores devem ser amplificados e filtrados. Isso foi feito usando-se dois condicionadores de sinais de quatro canais (Figura 3.8(b)), fabricados pela KISTLER, adequados para o tratamento de sinais provenientes de sensores piezelétricos. Esses equipamentos comunicam-se com o sistema de aquisição de dados através do painel de conexões de entradas/saídas visualizado na Figura 3.8(c). Uma especificação dos equipamentos está listada na Tabela 3.3.

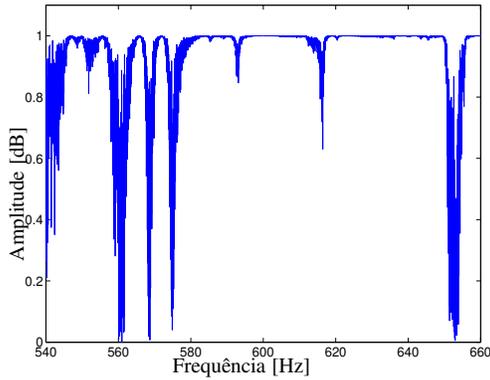
Tabela 3.3: Especificação de equipamentos.

equipamento	descrição básica	fabricante
sensor	<i>buzzers</i> de 20 [mm] de diâmetro, 3-30 [V]	–
atuador	QuickPack QP10N, 2,000 × 1,000 × 0,015 [in], ±200 [V]	ACX
amplificador de potência	1 canal	ACX
condicionador de sinais	4 canais	KISTLER
sistema de aquisição de dados	modelo DS1104	dSPACE

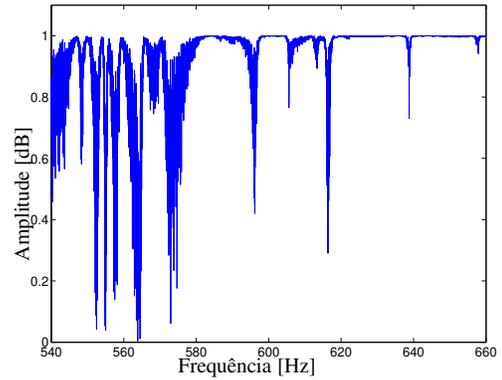
3.2.2 Identificação

As técnicas a serem usadas para o projeto de controladores de vibração e também para a detecção de falhas exigem um modelo matemático do sistema. Uma possibilidade para a obtenção desse modelo matemático é o uso do método de identificação de sistemas conhecido como ERA - *Eigenstructure Realization Algorithm*. Para a implementação do ERA foi utilizado o algoritmo descrito em Lew *e outros* (1993), além da implementação de Yang *e outros* (1994) para matriz de Hankel de sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

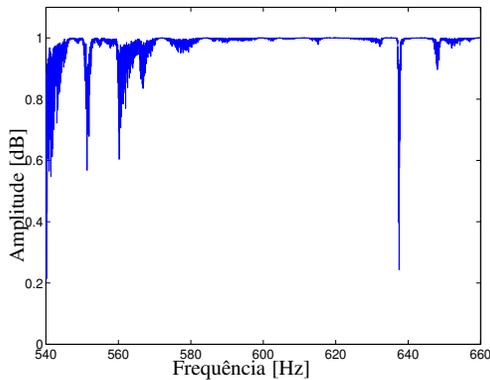
Para a obtenção de um modelo identificado de ordem finita é necessário fixar uma faixa de frequências na qual se deseja reproduzir as características da estrutura real. Tomando-se como base a faixa de trabalho da instrumentação disponível e também a conveniência de obtenção de um modelo matemático de ordem relativamente pequena (quanto maior a faixa maior a ordem do modelo), escolheu-se trabalhar com a placa na faixa de frequências entre 540 e 660 [Hz]. A estrutura foi excitada com uma varredura senoidal (função *chirp.m* do MATLAB) na faixa de frequências 500-800 [Hz], sendo apenas um atuador utilizado por vez. As 32 Funções de Resposta em Frequência (FRF) relacionando as quatro entradas com as oito saídas foram computadas, truncadas na faixa de interesse (540-660 [Hz]) e usadas na identificação do sistema com o método ERA. Funções de coerência relacionadas a algumas dessas medições podem ser verificadas na Figura 3.9. Alguns gráficos de FRF do sistema identificado e das medidas



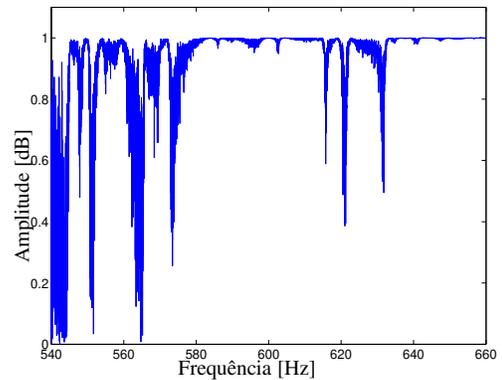
(a) Saída y_1 , entrada u_1 .



(b) Saída y_1 , entrada u_2 .



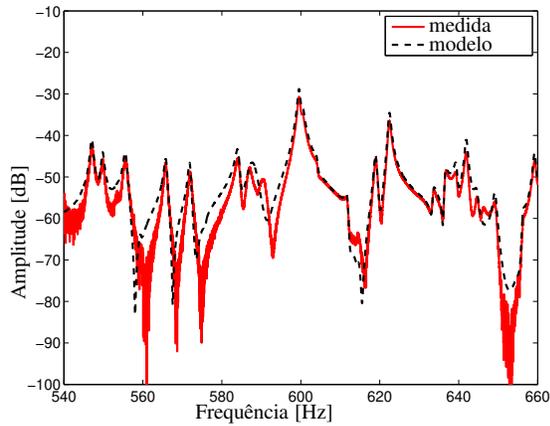
(c) Saída y_1 , entrada u_3 .



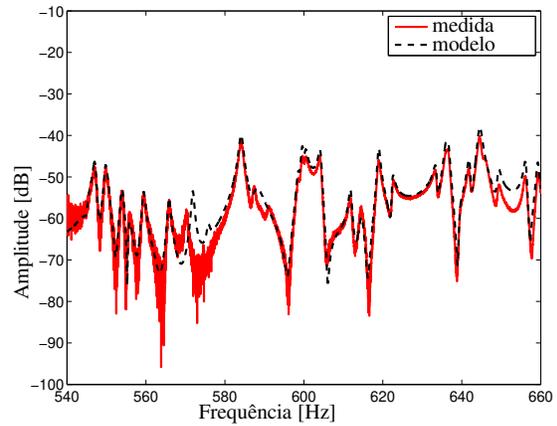
(d) Saída y_1 , entrada u_4 .

Figura 3.9: Funções de coerência dos sinais medidos.

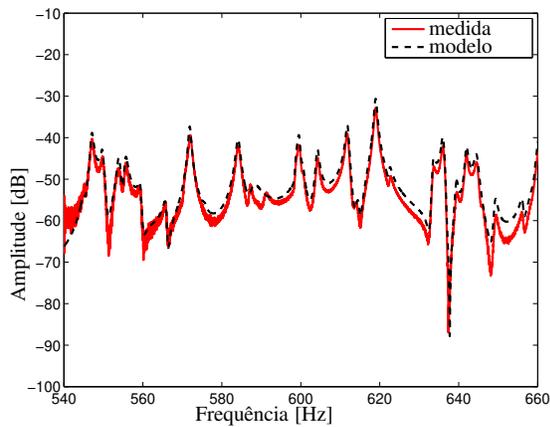
podem ser verificados na Figura 3.10. Percebe-se que o modelo identificado reproduz as medidas com erro considerado pequeno. Esse modelo identificado é de ordem 60, valor iterativamente ajustado. A faixa de frequências de trabalho foi determinada de acordo com as limitações da instrumentação disponível: frequências muito baixas forneciam medições muito suscetíveis a ruídos. Além disso, faixa extensa produziria modelo com ordem muito elevada.



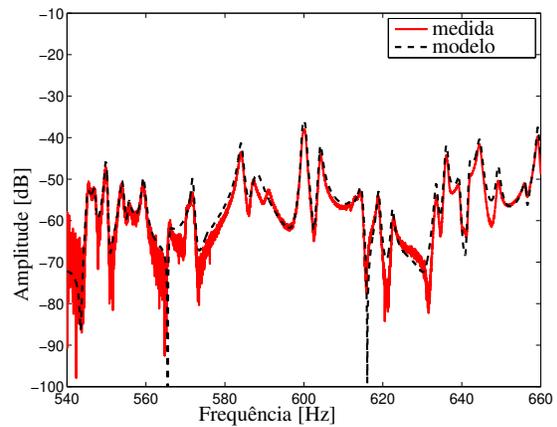
(a) Saída y_1 , entrada u_1 .



(b) Saída y_1 , entrada u_2 .



(c) Saída y_1 , entrada u_3 .



(d) Saída y_1 , entrada u_4 .

Figura 3.10: Funções de resposta em frequência (FRF) dos sinais medidos e do modelo identificado.

3.2.3 Controle

Para atenuar a vibração nessa faixa de frequências foi projetado um controlador \mathcal{H}_∞ (Figura 3.11). O sistema tem quatro entradas de controle que compõem o sinal u e oito saídas de medição que compõem o sinal y . Há ainda uma entrada de distúrbio w que se soma à primeira das entradas de controle. O sinal de desempenho é $w = [u \ y]^T$ e a ele são aplicadas funções de ponderação para: 1) garantir que a amplitude do esforço de controle seja mínima fora da faixa de frequências do modelo; 2) garantir que a amplitude máxima de vibração seja mínima dentro da faixa de frequências do modelo. Dito isso e sabendo-se que a placa é um sistema mecânico modelado em uma faixa que pode ser considerada como de baixas frequências, as funções de ponderação adotadas são aquelas descritas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Filtros de ponderação usados para o projeto do controlador a ser implementado na bancada. g : ganho na banda de rejeição; G : ganho na banda de passagem; ω_c : frequência de corte em [Hz].

Filtro	g	G	ω_c	ordem	tipo
W_y^c	0,001	100	1591,5	1	passa-baixa
W_u^c	0,001	1	238,7	2	passa-alta

O controlador obtido produz pequena atenuação em alguns dos picos do diagrama de valores singulares, conforme pode ser verificado na Figura 3.11. Houve uma redução de 26% na norma \mathcal{H}_∞ . Como o foco desse trabalho não é o projeto de controladores, assume-se que esse controle é razoável e servirá ao seu propósito: permitir a análise de técnicas de detecção de falhas de sensores em estruturas sob controle ativo de vibração.

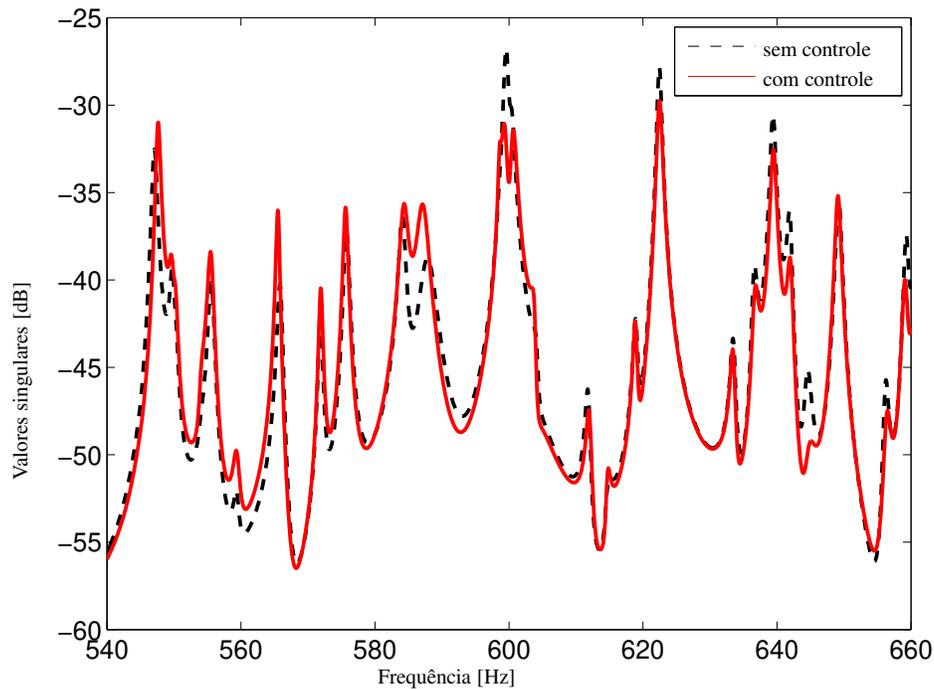


Figura 3.11: Diagrama de valores singulares dos sistemas com e sem controle.

3.3 Falhas multiplicativas

Nessa tese trabalha-se com falhas multiplicativas nos sensores, que podem ser interpretadas como ganhos reduzindo (ou aumentando) as amplitudes das medições fornecidas pelos sensores. Na prática, falhas multiplicativas podem estar relacionadas a erros de calibração (ABDELGHANI E FRISWELL, 2007), entretanto nessa tese não se pretende estudar os mecanismos de falhas, apenas detectar e isolar sensores fornecendo medições diferentes das esperadas.

Dessa forma, quando se diz que um sensor tem falha multiplicativa de 50%, ou simplesmente falha de 50%, isso significa que esse sensor está fornecendo uma medição com amplitude de 50% do valor real da grandeza medida. Essa terminologia será empregada nas sequências desse texto, que apresentará os resultados obtidos.

4 RESULTADOS

A fim de se avaliar os métodos de detecção de falhas, foram realizadas simulações com o modelo de placa obtido a partir do método dos elementos finitos (seção 3.1), simulações com o modelo de placa identificado experimentalmente (seção 3.2) e testes com a placa da bancada experimental (seção 3.2).

Nas simulações com o modelo de elementos finitos foram testados tanto o método de detecção com banco de estimadores (observador de saída, filtro de Kalman e filtro H-infinito) quanto as técnicas de referência: método de Abdelghani e Friswell (2007) e método de Kerschen *e outros* (2005). Nessas simulações, o método com banco de estimadores proposto nessa tese forneceu os melhores resultados. Por esse motivo, nas simulações com o modelo identificado experimentalmente apenas os resultados de detecção de falhas com o banco de estimadores serão apresentados.

Em seguida, foram realizados testes também na bancada experimental. Novamente foram usadas configurações do banco de estimadores com cada um dos três estimadores, sempre em conjunto com cada um dos indicadores sugeridos nessa tese.

4.1 Detecção de falhas com modelo de Elementos Finitos da placa

A placa modelada pelo método dos elementos finitos foi excitada com sinal de distúrbio do tipo varredura senoidal (função *chirp.m* no MATLAB), com frequências entre 16 e 47 [Hz] (em torno do primeiro modo) e amplitude 0,01. O intervalo de tempo utilizado foi de 100 [s] com tempo de amostragem 0,1 [ms]. Aos sinais medidos foram adicionados ruídos aleatórios (função *rand.m* do MATLAB) com média nula e desvio padrão $2,0 \times 10^{-6}$, com razões entre

Tabela 4.1: Razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos.

Saída	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Razão	0,28%	0,26%	1,01%	0,15%	0,15%	0,15%	0,15%	0,19%

máximas amplitudes dos ruídos e do sinais medidos mostradas na Tabela 4.1. Ressalta-se que dessa forma foi excitado apenas um modo de vibrar, justamente um dos modos controlados, conforme já apresentado na Figura 3.4.

A aplicação do sinal de distúrbio na placa com sensores intactos, com e sem controle, forneceu as respostas temporais apresentadas na Figura 4.1. Nota-se que o controle \mathcal{H}_∞ reduziu a máxima amplitude da resposta. A redução das máximas amplitudes de cada saída pode ser verificada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Redução das máximas amplitudes em virtude do controlador.

Saída	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Atenuação	71,77%	71,18%	59,94%	71,85%	71,65%	71,73%	71,55%	71,45%

4.1.1 Detecção de falhas com banco de estimadores

Os estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ foram testados juntamente com os indicadores DRMS, SME, SEQ e MAC na detecção de falhas de sensores da placa com controle de vibração. No projeto dos observadores de saída o único parâmetro é a matriz de ganhos que determina os polos do observador. Essa matriz de ganhos foi escolhida de modo a garantir polos dos observadores idênticos aos polos da planta. Para o filtro de Kalman, o projeto tem como parâmetros as covariâncias dos distúrbios e ruídos. Como trabalha-se com simulação e essas entradas exógenas são conhecidas, foram usados os valores exatos de covariância. Já no projeto dos estimadores \mathcal{H}_∞ foram usados filtros de ponderação para os sinais de desempenho. Todos os filtros foram idênticos e são descritos na Tabela 4.3. Além disso, com o intuito de pos-

teriormente mostrar a vantagem do reescalamiento dos indicadores, nessa seção trabalha-se com as versões sem o reescalamiento.

Tabela 4.3: Filtros de ponderação usados no projeto dos estimadores \mathcal{H}_∞ para modelo de elementos finitos. g : ganho na banda de rejeição; G : ganho na banda de passagem; ω_c : frequência de corte em [Hz].

Filtro	g	G	ω_c	ordem	tipo
W_z	0,001	10	700	1	passa-baixa

No caso de falha multiplicativa de 50% no sensor 1, indicadores calculados a partir dos estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ podem ser visualizados, respectivamente, na Figura 4.2, na Figura 4.3 e na Figura 4.4. Da mesma forma, uma falha de 50% no sensor 8 produziu os indicadores apresentados na Figura 4.5, na Figura 4.6 e na Figura 4.7.

Tanto para a falha no sensor 1 quanto para a falha no sensor 8 os indicadores com valor unitário sugerem a ocorrência de falha. Dessa forma, percebe-se que sob qualquer um dos estimadores os indicadores DRMS, SME e SEQ claramente isolaram as falhas enquanto o indicador MAC aparentemente fracassou¹.

Falhas simultâneas de 50% nos sensores 2 e 7 também foram testadas e os indicadores calculados podem ser verificados na Figura 4.8, na Figura 4.9 e na Figura 4.10. Com o observador de saída não foi possível isolar as falhas. Com os estimadores filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ foi possível o isolamento através dos indicadores SME e SEQ, porém não com o MAC. O indicador DRMS com o filtro \mathcal{H}_∞ também permitiu o isolamento da falha simultânea. Esses bancos de estimadores foram projetados para detectar falhas simultâneas em dois sensores.

¹Discussão na subseção 4.1.3.

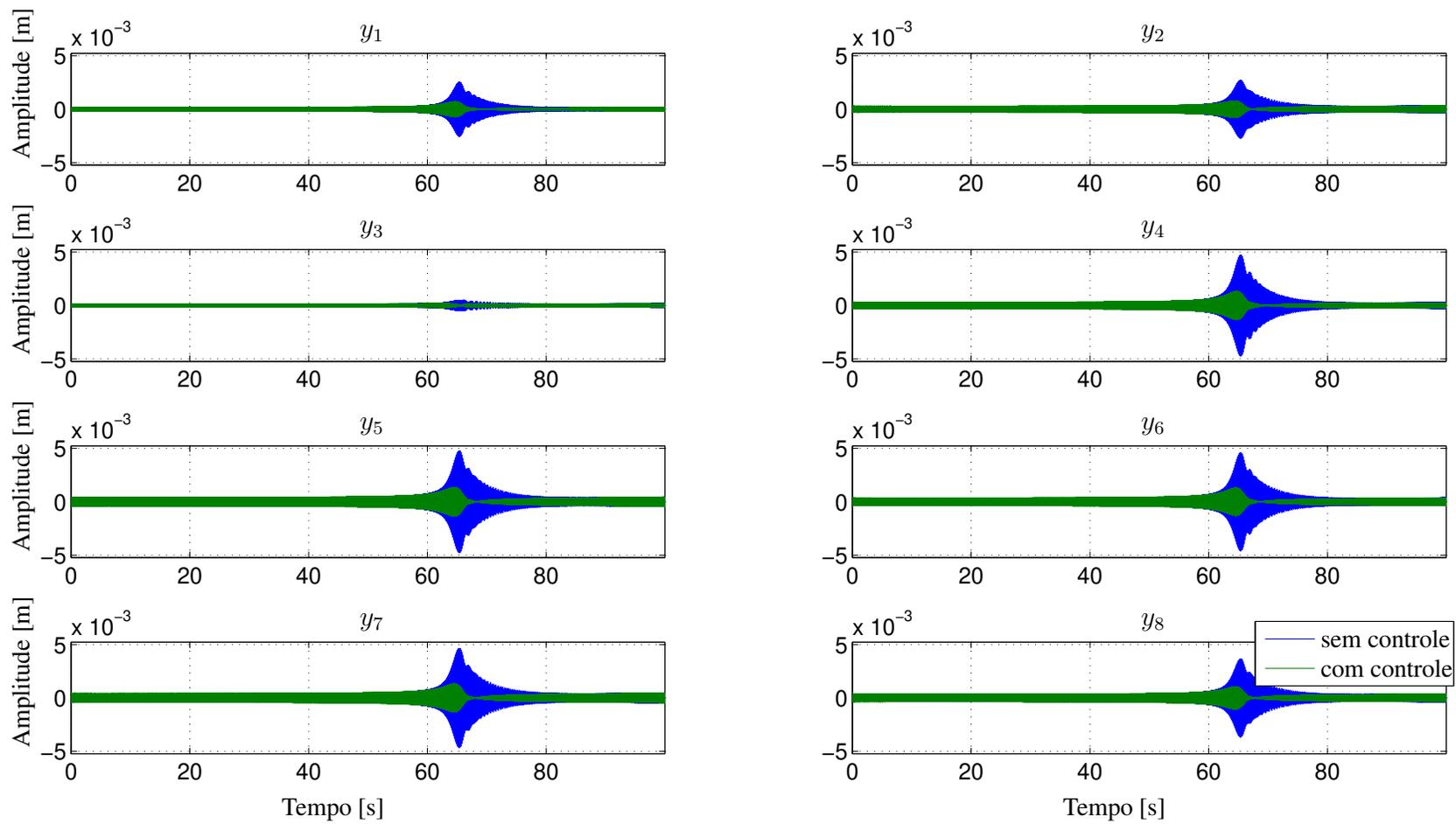


Figura 4.1: Resposta temporal com e sem controle.

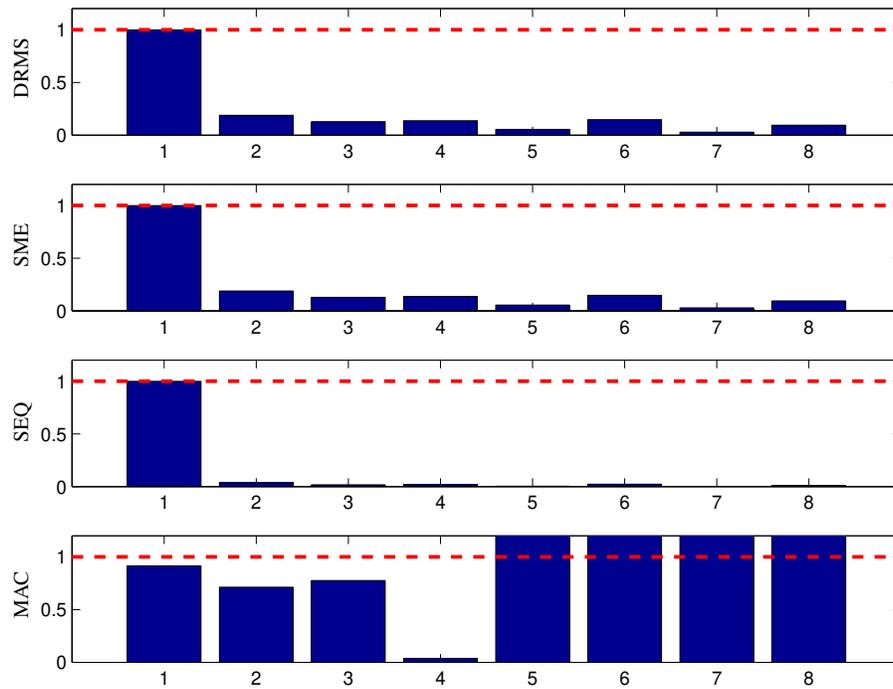


Figura 4.2: Falha de 50% no sensor 1 - observador de saída - simulação com modelo de elementos finitos.

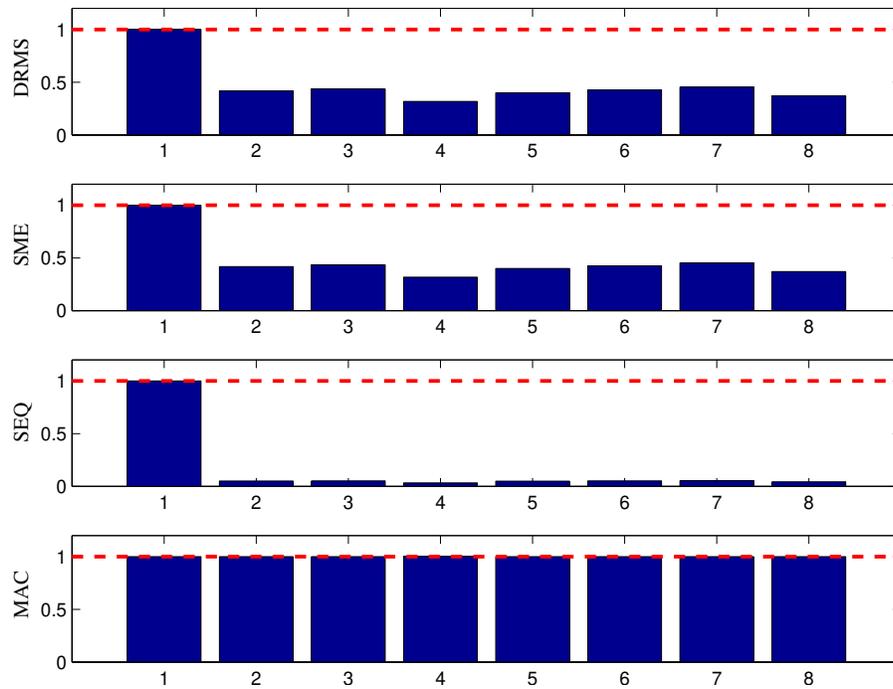


Figura 4.3: Falha de 50% no sensor 1 - filtro de Kalman - simulação com modelo de elementos finitos.

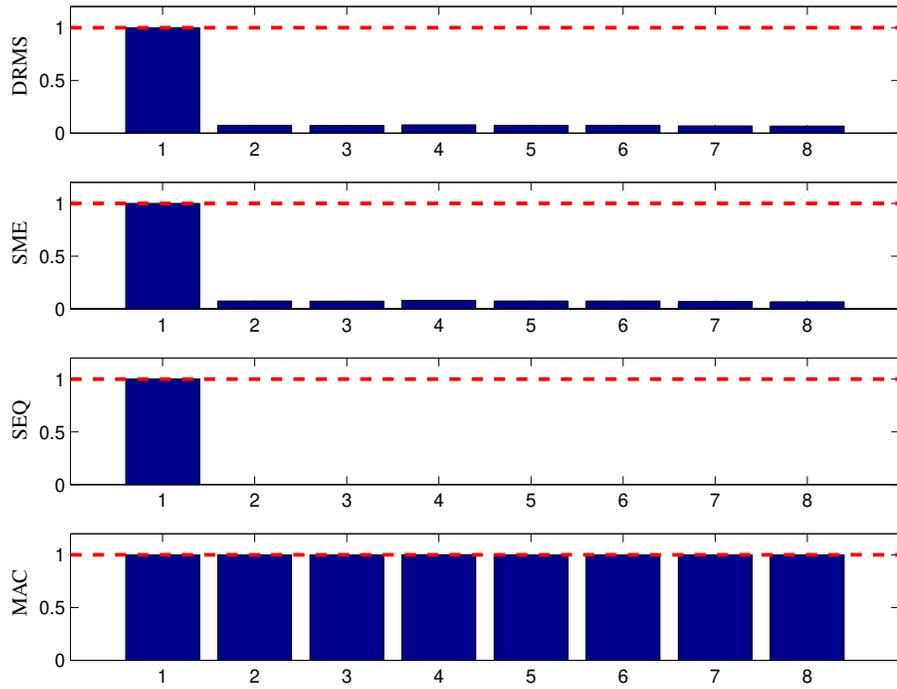


Figura 4.4: Falha de 50% no sensor 1 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo de elementos finitos.

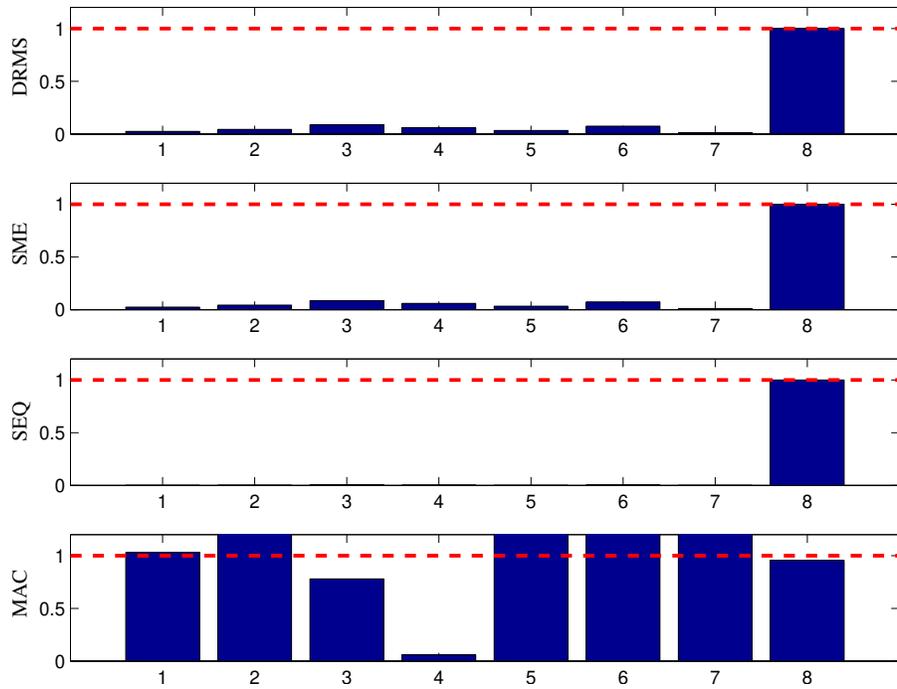


Figura 4.5: Falha de 50% no sensor 8 - observador de saída - simulação com modelo de elementos finitos.

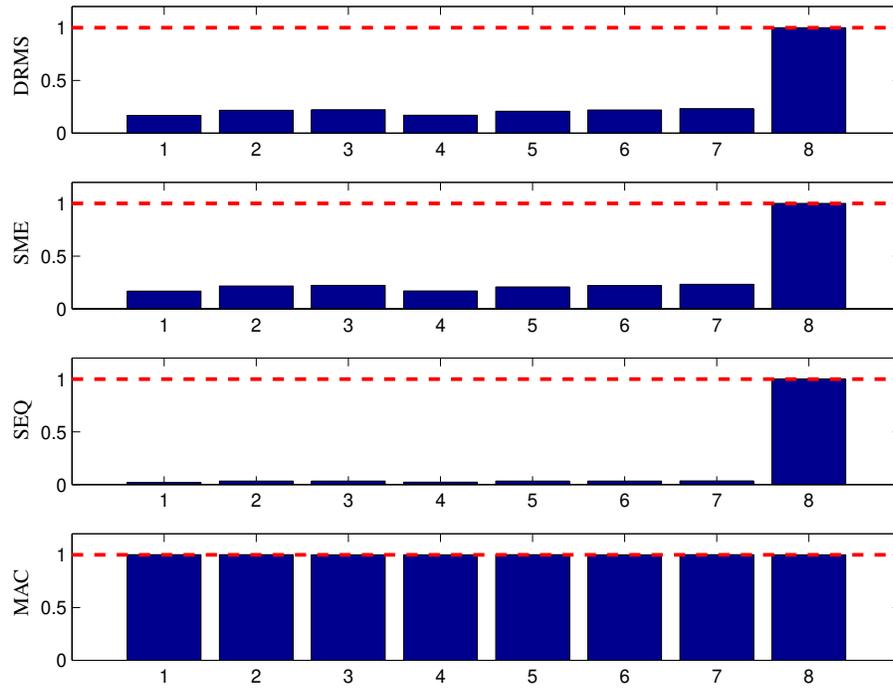


Figura 4.6: Falha de 50% no sensor 8 - filtro de Kalman - simulação com modelo de elementos finitos.

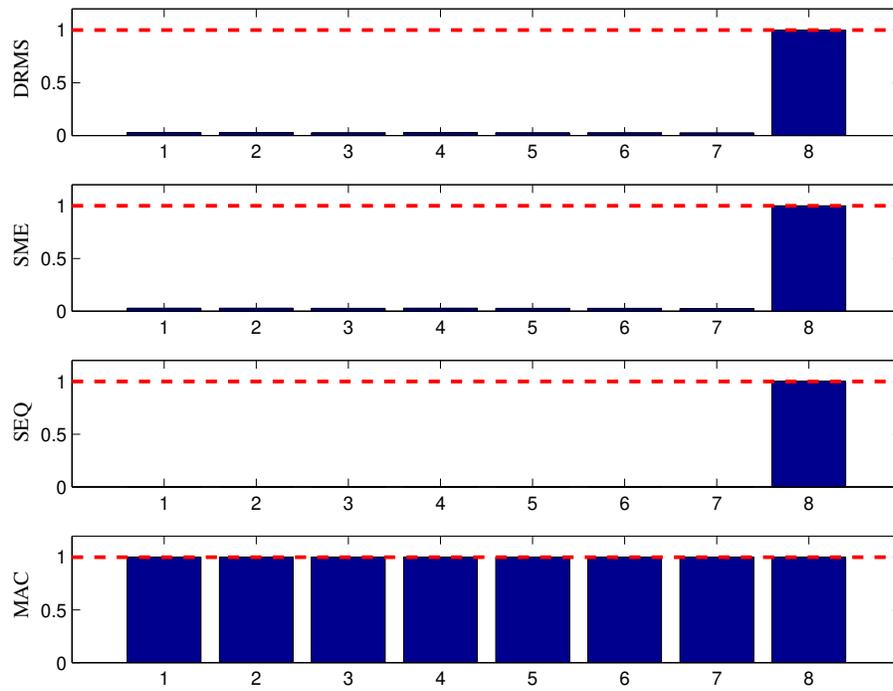


Figura 4.7: Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo de elementos finitos.

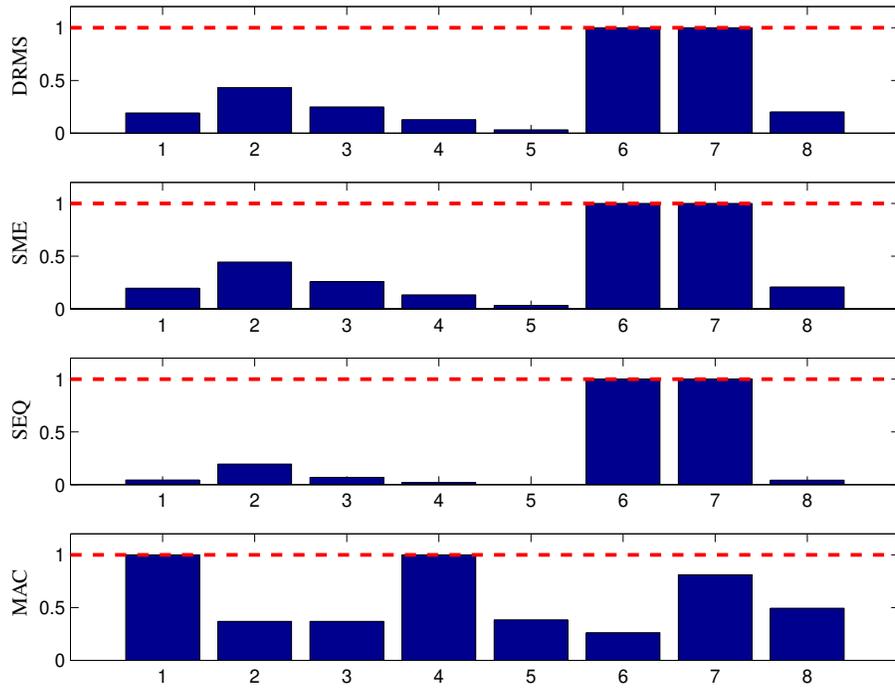


Figura 4.8: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - observador de saída - simulação com modelo de elementos finitos.

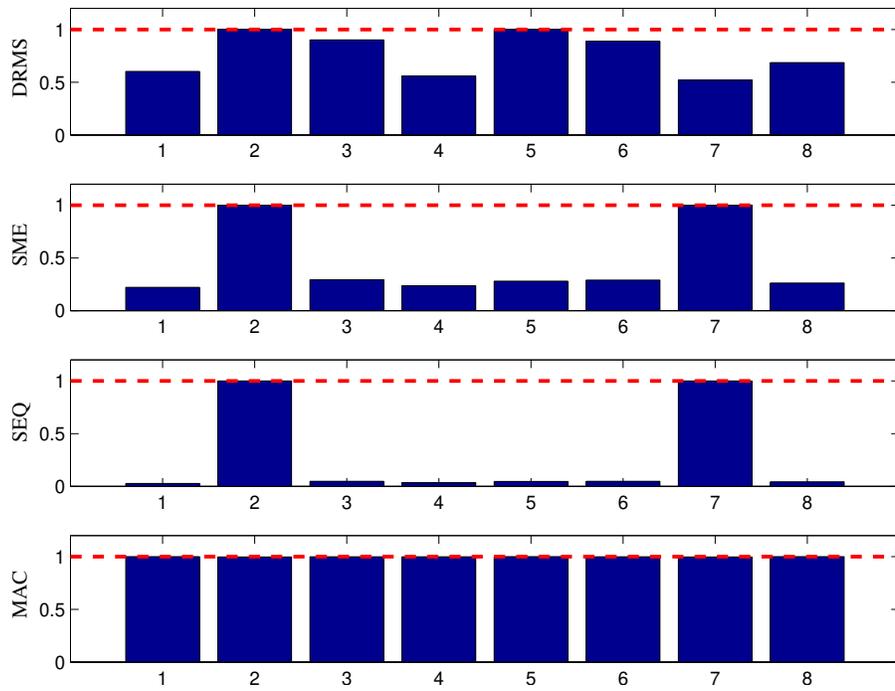


Figura 4.9: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro de Kalman - simulação com modelo de elementos finitos.

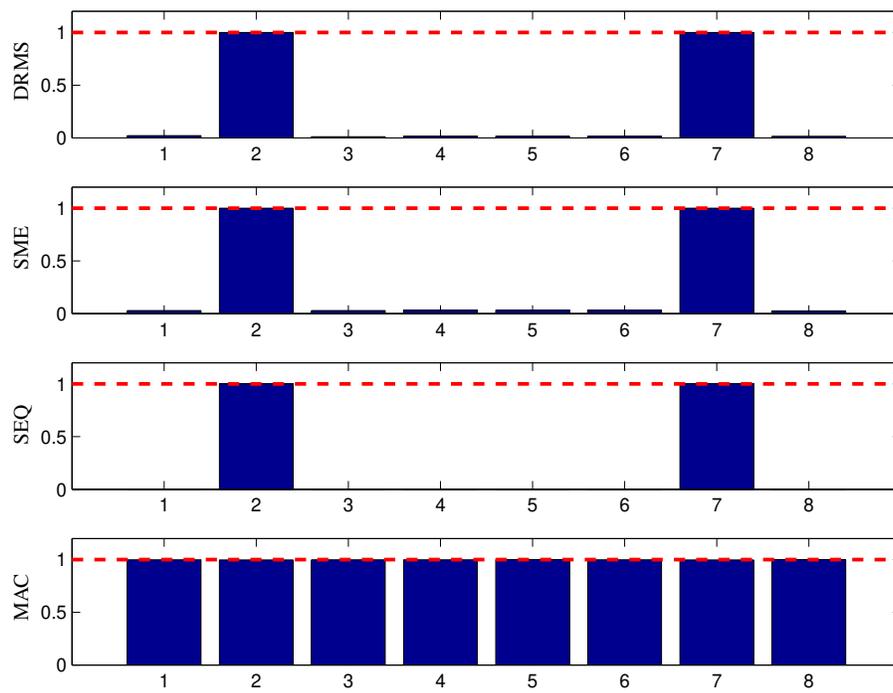


Figura 4.10: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo de elementos finitos.

4.1.2 Métodos de Abdelghani e Kerschen

O método de Abdelghani e Friswell (2007) e o método de Kerschen *e outros* (2005) também foram testados na detecção de falhas com o modelo de placa sob controle de vibração. Para avaliar o método de Abdelghani e Friswell (2007) foram realizadas simulações com as seguintes falhas multiplicativas: 50% no sensor 1 (Figura 4.11(a)), 50% no sensor 4 (Figura 4.11(b)), 50% no sensor 5 (Figura 4.11(c)) e 50% no sensor 8 (Figura 4.11(d)). O método não foi capaz de isolar as falhas nos sensores 4 e 5.

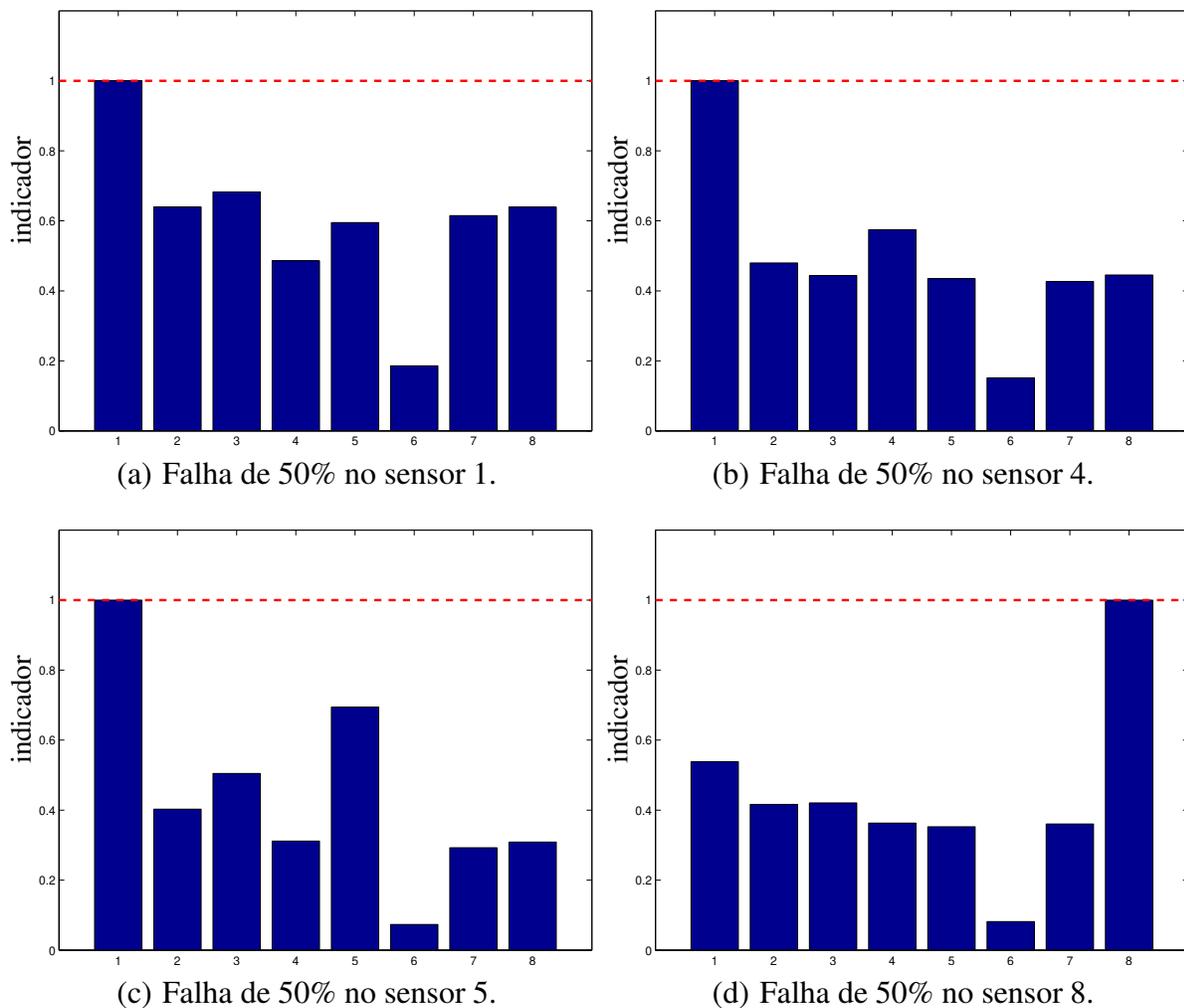


Figura 4.11: Método de Abdelghani e Friswell (2007) - modelo de elementos finitos.

Com o método de Kerschen *e outros* (2005) foram testadas as mesmas falhas: 50% no sensor 1 (Figura 4.12(a)), 50% no sensor 4 (Figura 4.12(b)), 50% no sensor 5 (Figura 4.12(c)) e 50% no sensor 8 (Figura 4.12(d)). Foram testadas também falhas simultâneas: primeiramente falhas de 50% nos sensores 1 e 5 (4.13(a)) e posteriormente falhas de 50% nos sensores 2 e 7 (4.13(b)). O método foi capaz de isolar todas as falhas.

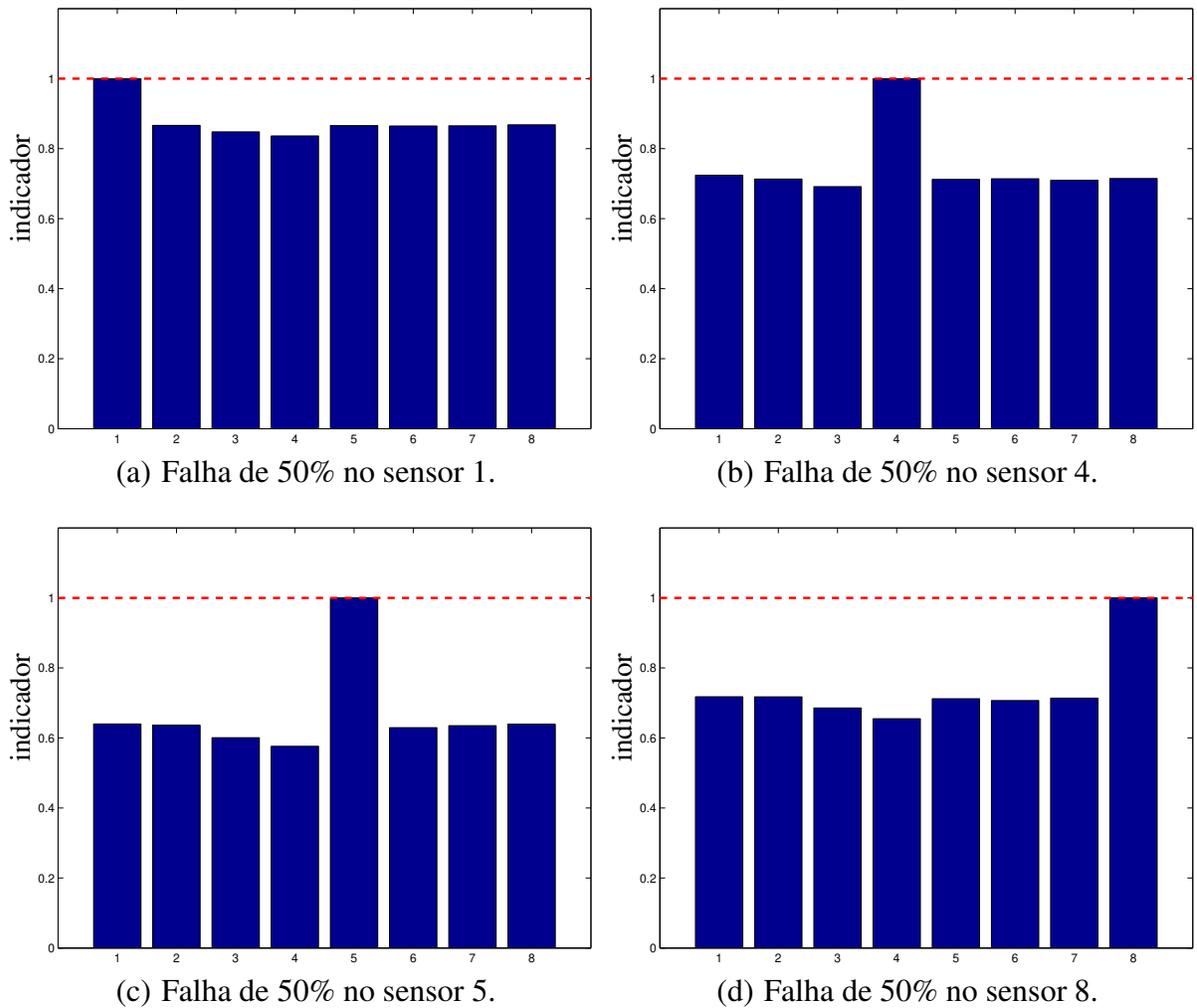


Figura 4.12: Método de Kerschen *e outros* (2005) - modelo de elementos finitos.

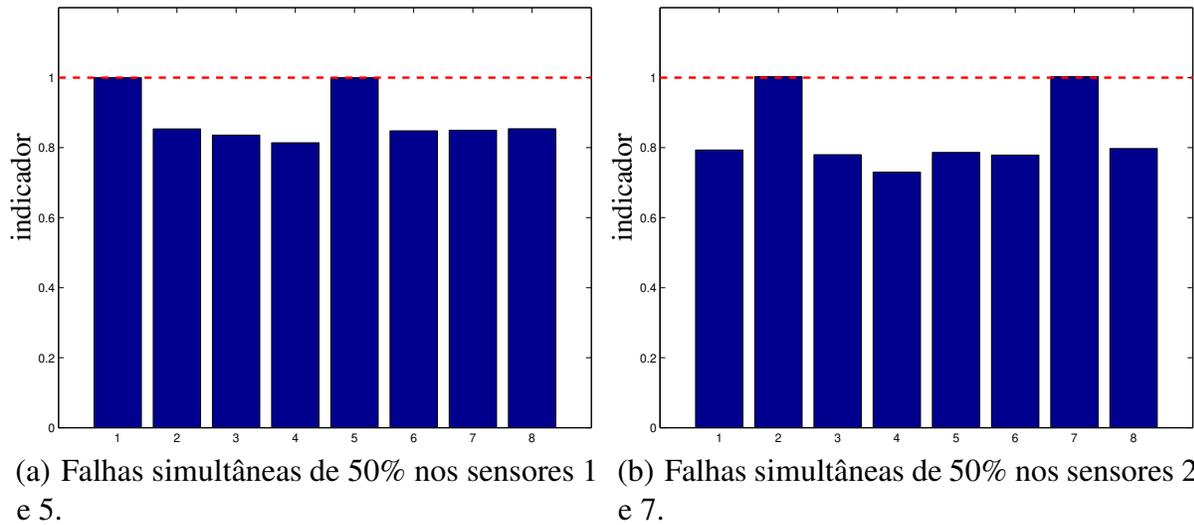


Figura 4.13: Método de Kerschen *e outros* (2005), falhas simultâneas - modelo de elementos finitos.

4.1.3 Comentários

O método do banco de estimadores funcionou bem com os estimadores filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ desde que usados em conjunto com os indicadores DRMS, SME e SEQ. Com esses indicadores, o estimador filtro \mathcal{H}_∞ permitiu inclusive o isolamento das falhas simultâneas, o que o estimador filtro de Kalman foi capaz de prover apenas com os indicadores SME e SEQ. O estimador observador de saída não foi capaz de isolar falhas simultâneas. A Tabela 4.4 facilita a comparação desses resultados. O indicador MAC aparentemente fracassou em todos os casos, entretanto, o reescalamiento dos indicadores apresentado na Figura 4.14, no caso de falha de 50% no sensor 8, mostra que o indicador MAC pode permitir o isolamento de falha. Nos testes que se sucedem, os indicadores serão apresentados nessa versão reescalada, pois essa manipulação melhora consideravelmente os indicadores.

Quanto aos métodos de referência, o método de Abdelghani e Friswell (2007) não foi capaz de isolar todas as falhas ao passo que o método de Kerschen *e outros* (2005) funcionou

Tabela 4.4: Comparação dos resultados obtidos com modelo de elementos finitos.

(a) Observador de saída				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✗
y_8	✓	✓	✓	✗
y_2 e y_7	✗	✗	✗	✗

(b) Filtro de Kalman				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✗
y_8	✓	✓	✓	✗
y_2 e y_7	✗	✓	✓	✗

(c) Filtro \mathcal{H}_∞				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✗
y_8	✓	✓	✓	✗
y_2 e y_7	✓	✓	✓	✗

✓ indica sucesso e ✗ indica fracasso.

muito bem, sendo capaz de isolar até mesmo falhas simultâneas. Comparando-se o método de Kerschen *e outros* (2005) com o método do banco de estimadores, percebe-se que os bancos com estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ , em conjunto com indicadores DRMS, SME e SEQ, fornecem resultados que permitem visualizar de forma mais nítida a falha. Essa era a hipótese que se pretendia comprovar com as simulações aqui diligenciadas: o banco de estimadores é uma alternativa viável para o isolamento de falhas de sensores em estruturas flexíveis com controle de vibração. Sendo assim, os testes adiante serão utilizados para comprovar a exequibilidade do banco de estimadores no isolamento de falhas de sensores em estruturas reais, tomando-se primeiro o modelo de placa identificado e posteriormente a placa na bancada experimental.

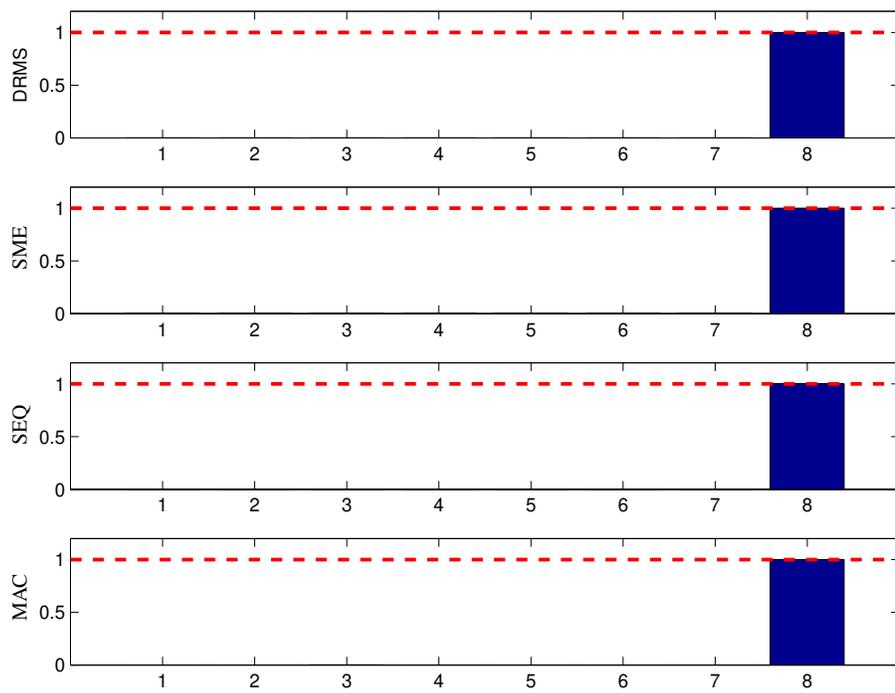


Figura 4.14: Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicadores reescalados - simulação com modelo de elementos finitos.

4.2 Detecção de falhas com modelo de placa identificado experimentalmente

O modelo de placa obtido através de identificação experimental com o método ERA foi excitado com sinal de distúrbio do tipo varredura senoidal (função *chirp.m* do MATLAB) com frequências entre 560 e 650 [Hz] e amplitude 0,01. O intervalo de tempo utilizado foi de 100 [s] com tempo de amostragem 0,1 [ms]. Aos sinais medidos foram adicionados ruídos aleatórios (função *rand.m* do MATLAB) com média nula e desvio padrão $2,0 \times 10^{-6}$, com razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos mostradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos.

Saída	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Razão	4,53%	5,91%	6,00%	12,13%	9,10%	12,46%	20,79%	6,36%

A excitação da placa com sensores intactos, nas condições com e sem controle, forneceu as respostas temporais apresentadas na Figura 4.15. Nota-se que o controle \mathcal{H}_∞ reduziu a máxima amplitude da resposta. A redução das máximas amplitudes de cada saída pode ser verificada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Redução das máximas amplitudes em virtude do controlador.

Saída	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Atenuação	38,76%	26,61%	17,63%	14,46%	17,28%	34,07%	10,97%	18,05%

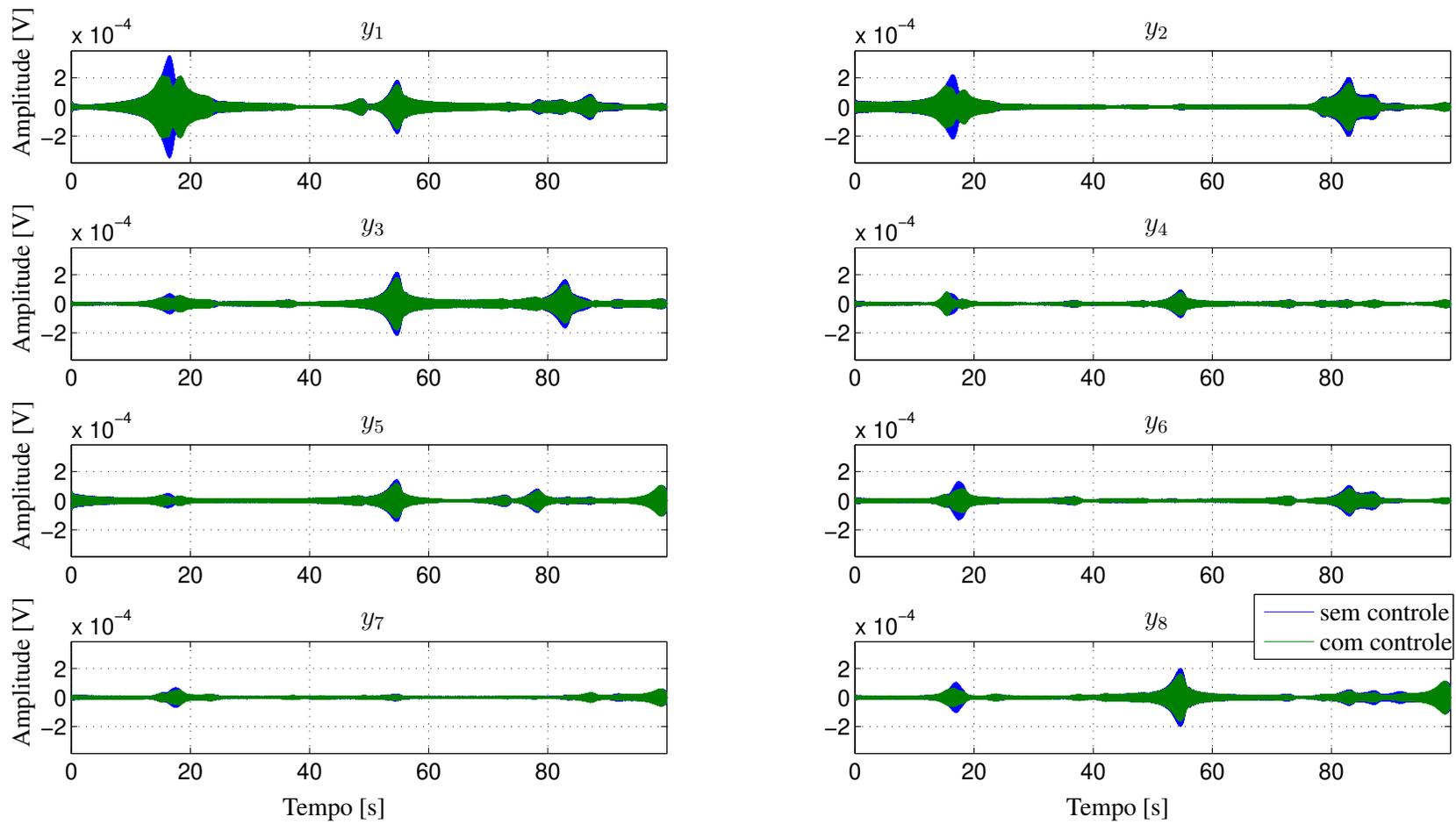


Figura 4.15: Resposta temporal com e sem controle.

4.2.1 Detecção de falhas com banco de estimadores

Assim como foi feito com o modelo de elementos finitos, com o modelo identificado também foram testados os estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ juntamente com os indicadores DRMS, SME, SEQ e MAC para a detecção de falhas de sensores na placa com controle de vibração. No projeto dos observadores de saída o único parâmetro é a matriz de ganhos que determina os polos do observador. Essa matriz de ganhos foi escolhida de modo a garantir polos dos observadores idênticos aos polos da planta. Para o filtro de Kalman, o projeto tem como parâmetros as covariâncias dos distúrbios e ruídos. Como trabalha-se com simulação e essas entradas exógenas são conhecidas, foram usados os valores exatos de covariância. Já no projeto dos estimadores \mathcal{H}_∞ foram usados filtros de ponderação para os sinais de desempenho. Todos os filtros foram idênticos e são descritos na Tabela 4.7. Ressalta-se que nessa seção são usadas versões reescaladas dos indicadores.

Tabela 4.7: Filtros de ponderação usados no projeto dos estimadores \mathcal{H}_∞ para modelo identificado experimentalmente. g : ganho na banda de rejeição; G : ganho na banda de passagem; ω_c : frequência de corte em [Hz].

Filtro	g	G	ω_c	ordem	tipo
W_z	0,001	10	700	1	passa-baixa

No caso de falha multiplicativa de 50% no sensor 1, indicadores reescalados calculados a partir dos estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ podem ser visualizados, respectivamente, na Figura 4.16, na Figura 4.17 e na Figura 4.18.

Da mesma forma, uma falha de 50% no sensor 8 produziu os indicadores reescalados apresentados na Figura 4.19, na Figura 4.20 e na Figura 4.21.

Para a falha no sensor 1, todos os estimadores e indicadores isolaram a falha. Já para a falha no sensor 8, o estimador observador de saída isolou a falha com todos os indicadores

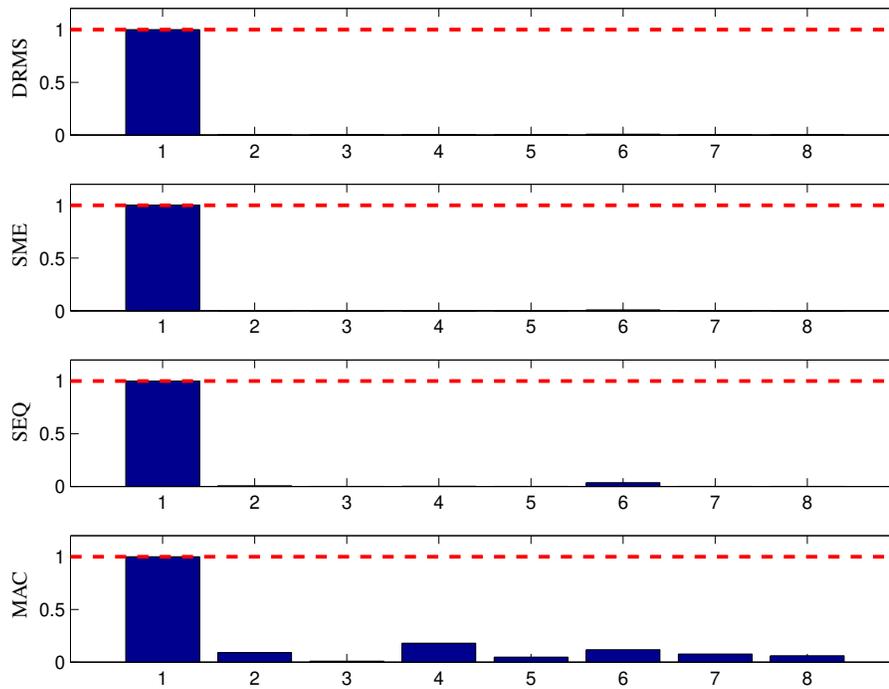


Figura 4.16: Falha de 50% no sensor 1 - observador de saída, indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

enquanto o filtro de Kalman e o filtro \mathcal{H}_∞ isolaram a falha apenas quando aplicado o indicador MAC.

Falhas simultâneas de 50% nos sensores 1 e 5 também foram testadas. Nesse caso, os bancos de estimadores foram projetados para isolar até duas falhas simultaneamente. Os indicadores resultantes podem ser verificados na Figura 4.22, na Figura 4.23 e na Figura 4.24. Apenas o observador de saída, com os indicadores DRMS, SME e SEQ, foi capaz de isolar as duas falhas.

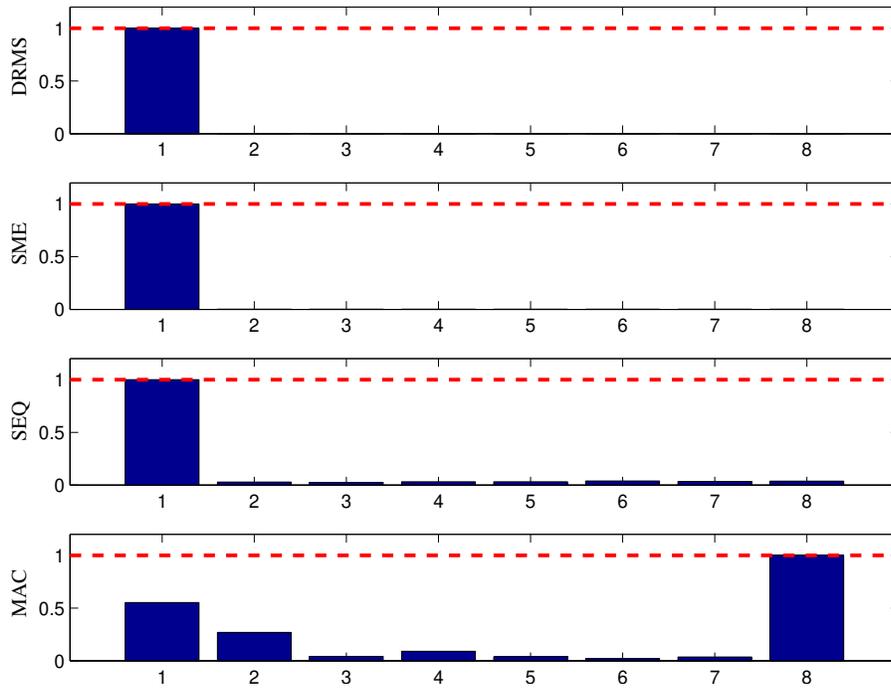


Figura 4.17: Falha de 50% no sensor 1 - filtro de Kalman, indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

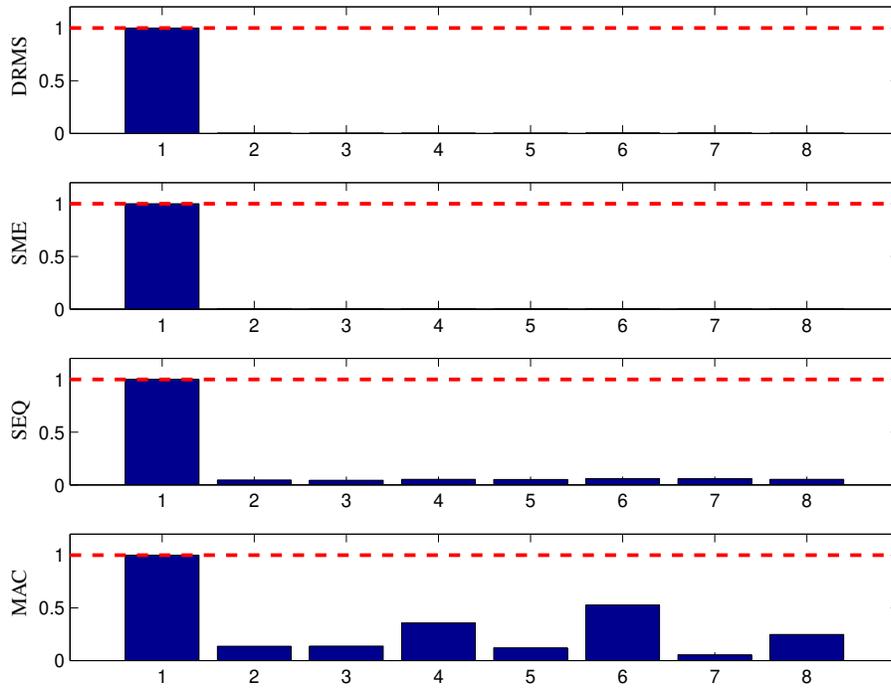


Figura 4.18: Falha de 50% no sensor 1 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

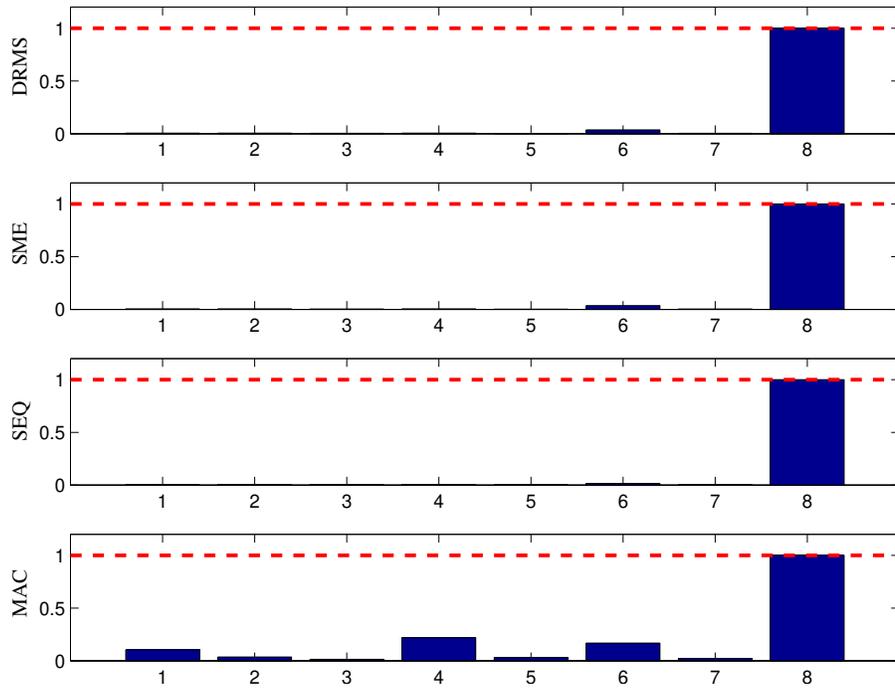


Figura 4.19: Falha de 50% no sensor 8 - observador de saída, indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

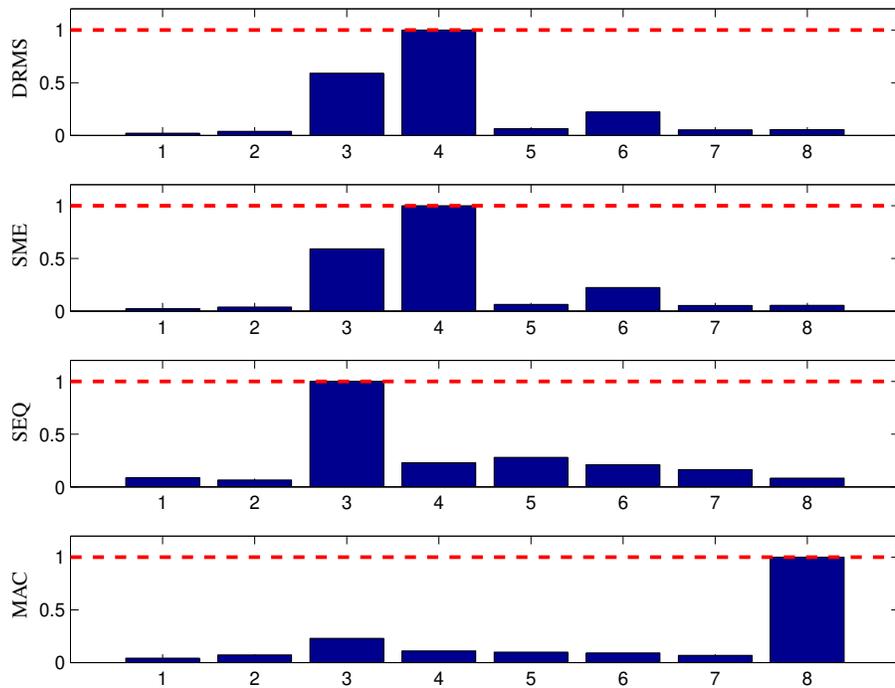


Figura 4.20: Falha de 50% no sensor 8 - filtro de Kalman, indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

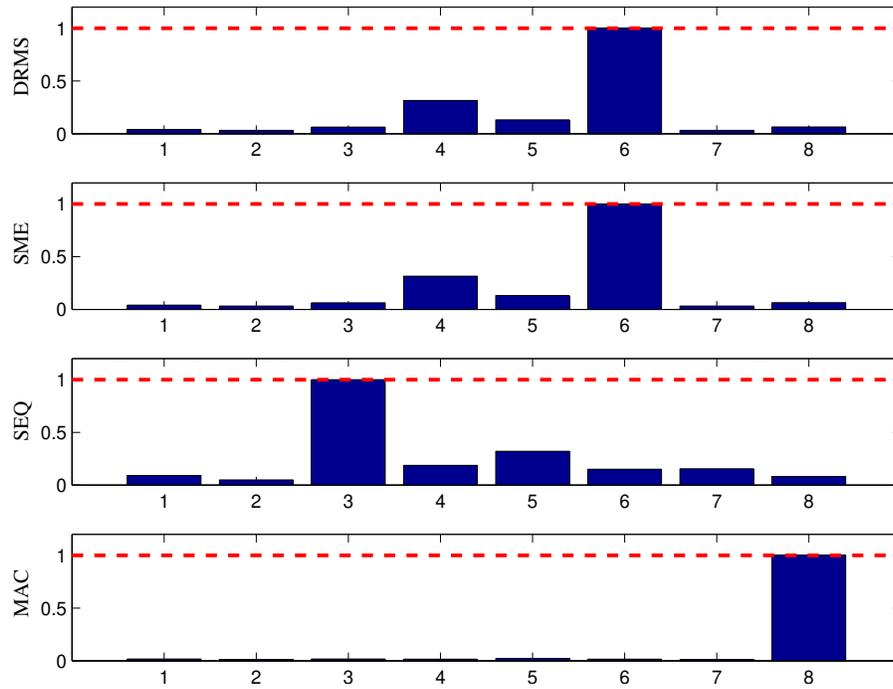


Figura 4.21: Falha de 50% no sensor 8 - filtro \mathcal{H}_∞ , indicador reescalado - simulação com modelo identificado experimentalmente.

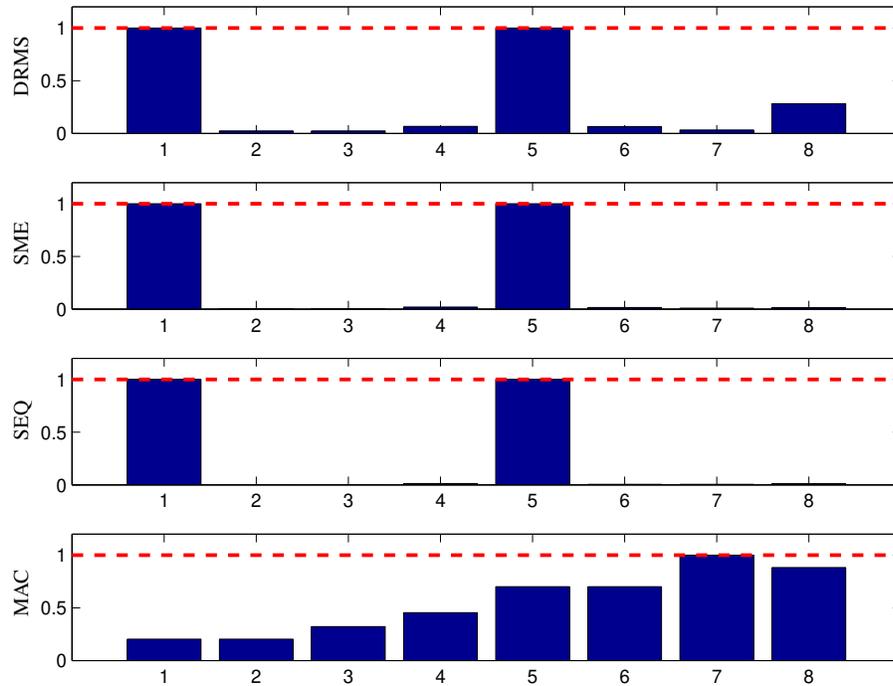


Figura 4.22: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - observador de saída - simulação com modelo identificado experimentalmente.

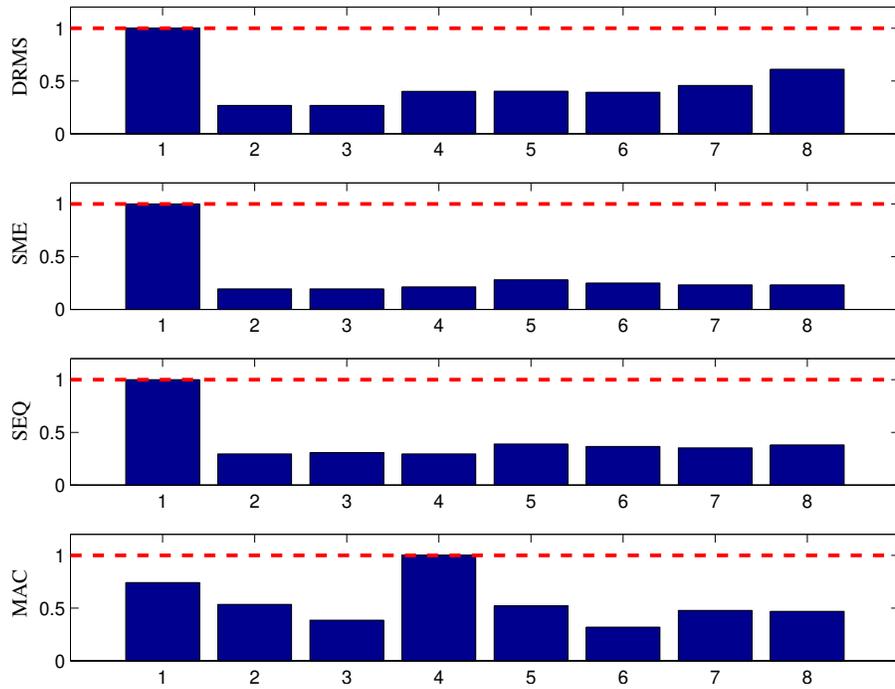


Figura 4.23: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro de Kalman - simulação com modelo identificado experimentalmente.

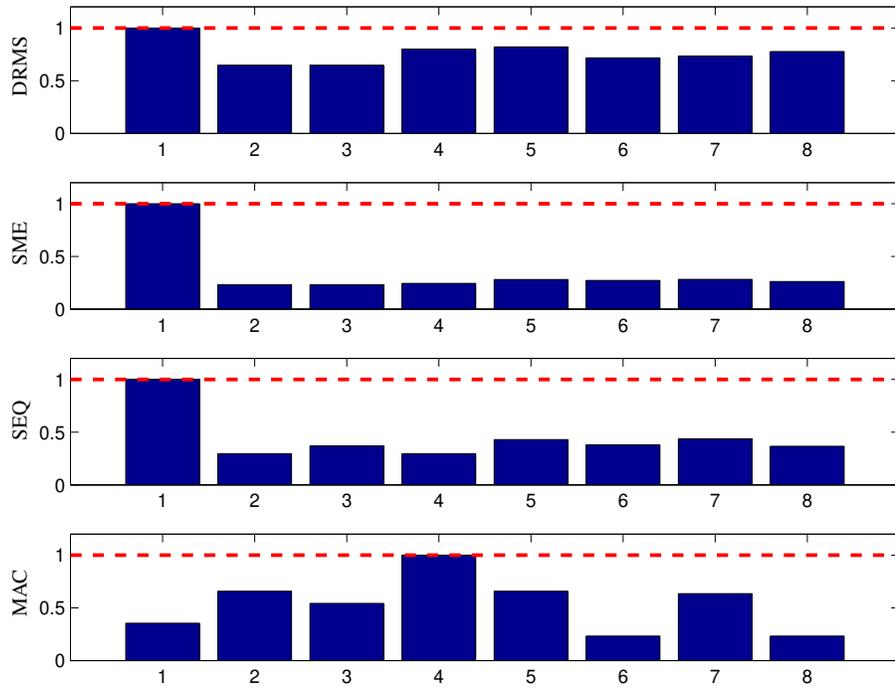


Figura 4.24: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo identificado experimentalmente.

4.2.2 Comentários

Os resultados com o modelo identificado experimentalmente mostraram que o estimador que conseguiu uma maior quantidade de sucessos no isolamento de falhas foi o observador de saída. Mesmo as falhas simultâneas foram satisfatoriamente isoladas. Os estimadores filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ só foram capazes de isolar a falha do sensor 8 quando aplicado o indicador MAC. A Tabela 4.8 auxilia a análise desses resultados.

Tabela 4.8: Comparação dos resultados obtidos com modelo identificado experimentalmente.

(a) Observador de saída				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✓
y_8	✓	✓	✓	✓
y_2 e y_7	✓	✓	✓	✗

(b) Filtro de Kalman				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✗
y_8	✗	✗	✗	✓
y_2 e y_7	±	±	±	✗

(c) Filtro \mathcal{H}_∞				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✓
y_8	✗	✗	✗	✓
y_2 e y_7	±	±	±	✗

✓ indica sucesso, ✗ indica fracasso e ± indica sucesso parcial.

Tanto o filtro de Kalman quanto o filtro \mathcal{H}_∞ envolvem parâmetros de projeto que nem sempre são de escolha trivial, como é o caso das covariâncias dos distúrbios e ruídos no filtro de Kalman e dos ajustes de filtros de ponderação no filtro \mathcal{H}_∞ . Talvez um melhor ajuste desses parâmetros poderia levar a melhores resultados. Entretanto, fica evidente uma vantagem do observador de saída: simplicidade do projeto sem necessidades de maiores ajustes. É importante ressaltar que nessa tese trabalha-se com baixo grau de incerteza nos modelos e por isso o

observador de saída mostra-se satisfatório.

4.3 Detecção de falha via testes experimentais com placa

A placa da bancada experimental foi excitada com sinal de distúrbio do tipo varredura senoidal (*chirp.m*) com frequências de 560 a 650 [Hz] e amplitude unitária, de forma a excitar apenas na faixa para a qual o controlador foi projetado (seção 3.2). O tempo de aquisição foi de 10 [s], com período de amostragem de 0,5 [ms]. Falhas multiplicativas foram artificialmente induzidas através de ganhos estáticos colocados entre o sensor e o controlador, no software do sistema de aquisição de dados. As medições foram realizadas com falhas de 50% nos sensores 1, 2, 3 e 4, uma de cada vez. Foram induzidas ainda falhas simultâneas de 50% nos sensores 1 e 5 e, num outro teste, falhas simultâneas de 50% nos sensores 2 e 7. Foram utilizados para a detecção de falhas os bancos de estimadores com observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ e os indicadores reescalados DRMS, SME, SEQ e MAC, conforme projetado para o modelo identificado da placa.

A excitação da placa saudável, nas condições com e sem controle, forneceu as respostas temporais apresentadas na Figura 4.25. Nota-se a redução das amplitudes de vibração em decorrência da atuação do controlador. A redução das máximas amplitudes de cada saída pode ser verificada na Tabela 4.9. Nota-se que a saída y_8 foi amplificada (10,53%) pelo controlador e a saída y_5 foi a mais atenuada (35,80%).

Tabela 4.9: Redução das máximas amplitudes em virtude do controlador.

Saída	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
Atenuação	21,79%	-0,18%	8,58%	13,15%	35,80%	3,12%	6,52%	-10,53%

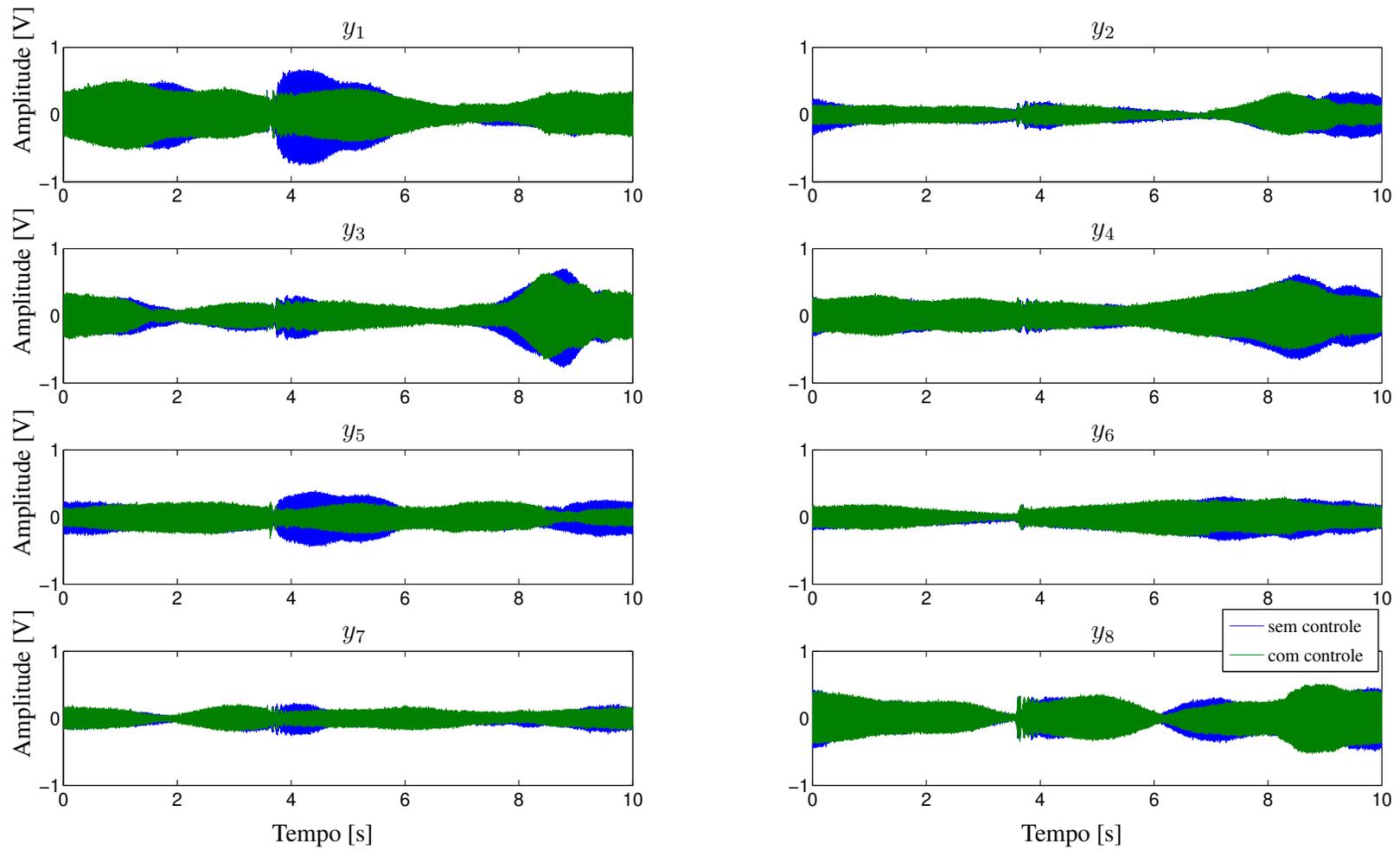


Figura 4.25: Resposta temporal, obtida experimentalmente, a uma entrada de distúrbio atuando sobre a placa com controle.

4.3.1 Detecção de falhas com banco de estimadores - observador de saída

Os indicadores reescalados DRMS, SME, SEQ e MAC calculados a partir do banco com observadores de saída tomando-se medições com falha de 50% no sensor 1, 50% no sensor 2, 50% no sensor 3 e 50% no sensor 4 podem ser verificados, respectivamente, na Figura 4.26, na Figura 4.27, na Figura 4.28 e na Figura 4.29. Resultados para falhas simultâneas de 50% nos sensores 1 e 5 são apresentados na Figura 4.30 e para falhas simultâneas de 50% nos sensores 2 e 7 na Figura 4.31.

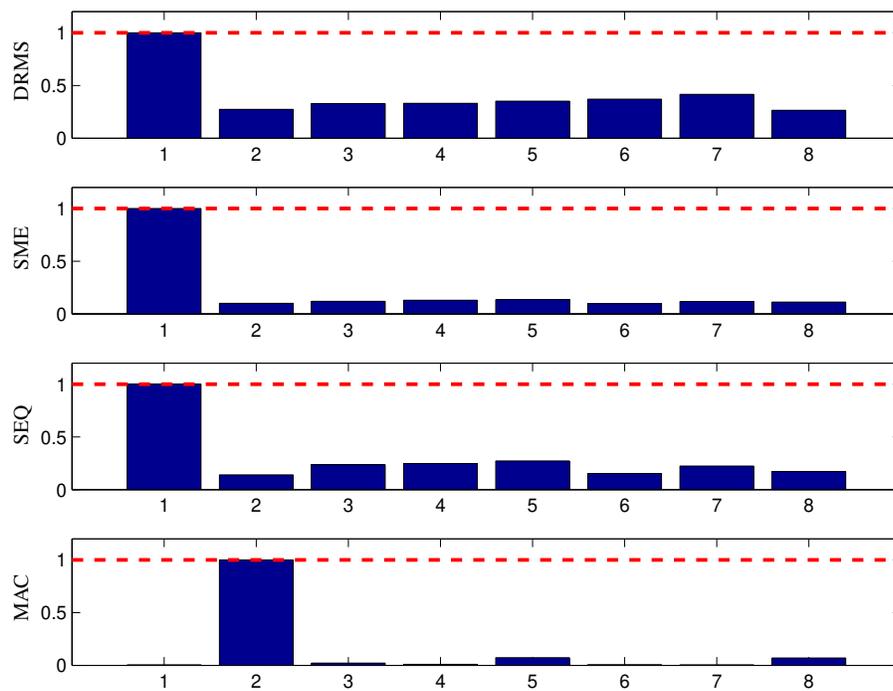


Figura 4.26: Falha de 50% no sensor 1 - observador - resultado experimental.

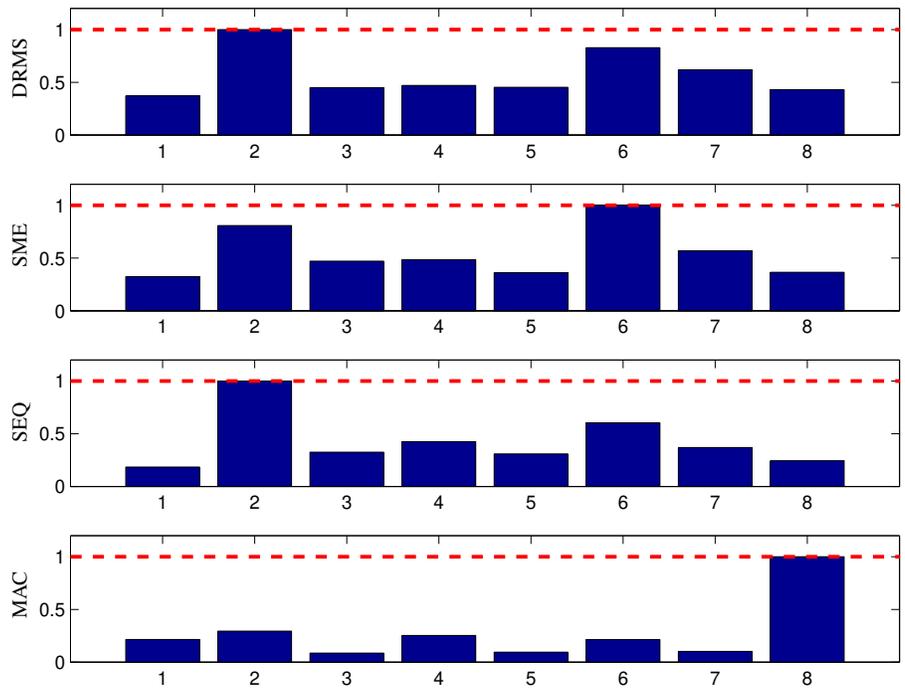


Figura 4.27: Falha de 50% no sensor 2 - observador - resultado experimental.

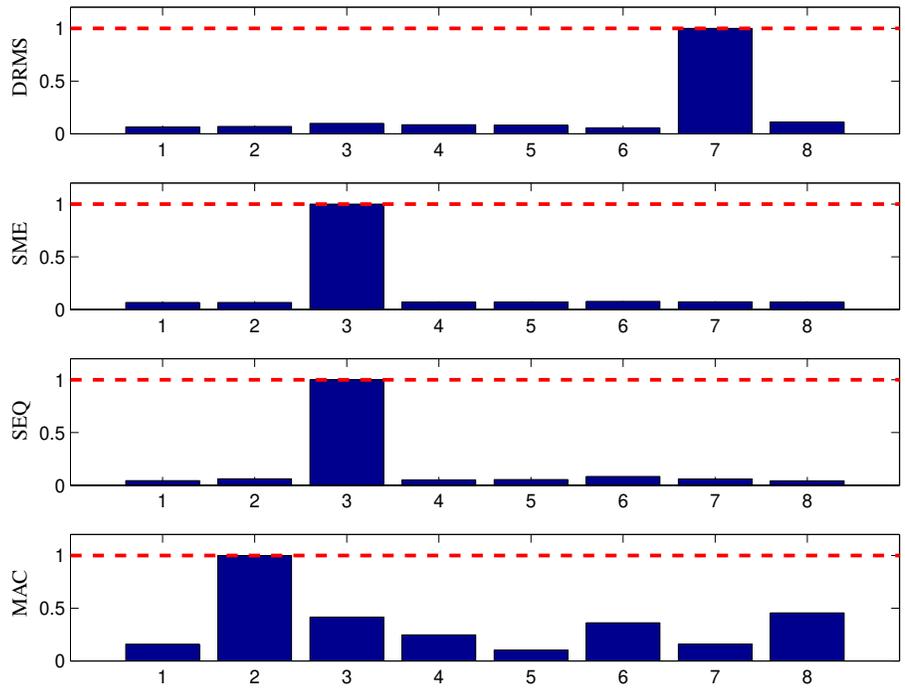


Figura 4.28: Falha de 50% no sensor 3 - observador - resultado experimental.

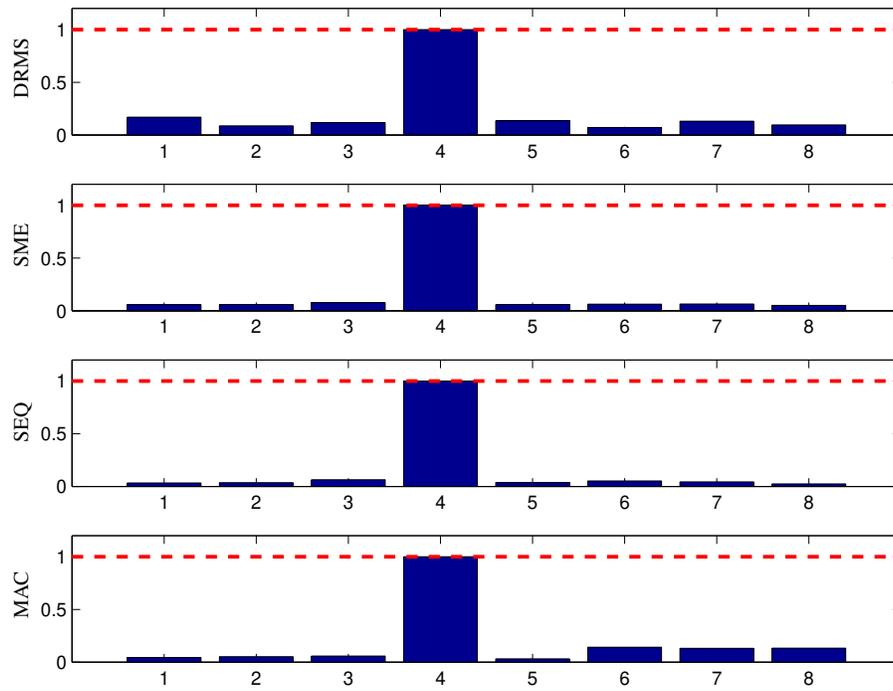


Figura 4.29: Falha de 50% no sensor 4 - observador - resultado experimental.

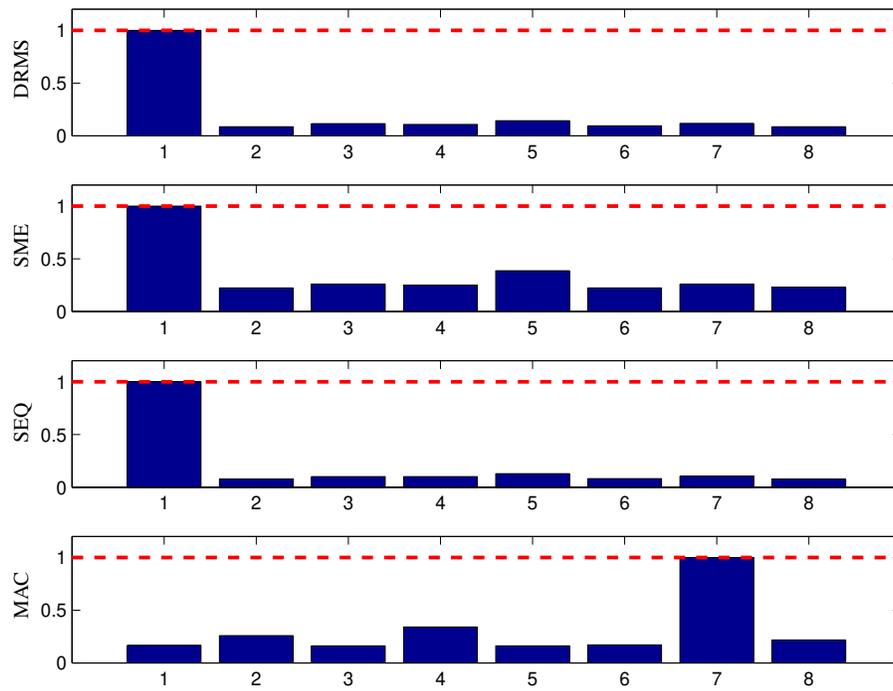


Figura 4.30: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - observador - resultado experimental.

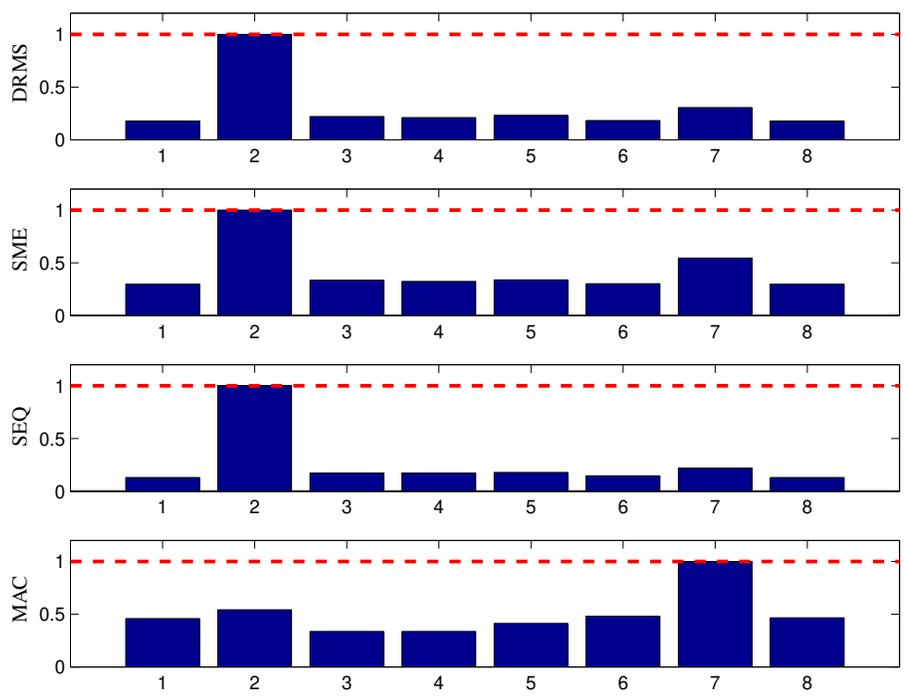


Figura 4.31: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - observador - resultado experimental.

A seguir são sintetizados os resultados dos indicadores usados em conjunto com o observador de saída:

DMRS foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2 e 4, porém não isolou a falha no sensor 3 e nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

SME foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 3 e 4, porém não isolou a falha no sensor 2 e nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

SEQ foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2, 3 e 4, mas nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

MAC foi capaz de isolar apenas a falha no sensor 4.

4.3.2 Detecção de falhas com banco de estimadores - filtro de Kalman

Os indicadores calculados a partir do banco com filtros de Kalman tomando-se as medições com falha de 50% no sensor 1, 50% no sensor 2, 50% no sensor 3 e 50% no sensor 4, podem ser verificados, respectivamente, na Figura 4.32, na Figura 4.33, na Figura 4.34 e na Figura 4.35. Resultados para falhas simultâneas de 50% nos sensores 1 e 5 são apresentados na Figura 4.36 e para falhas simultâneas de 50% nos sensores 2 e 7 na Figura 4.37.

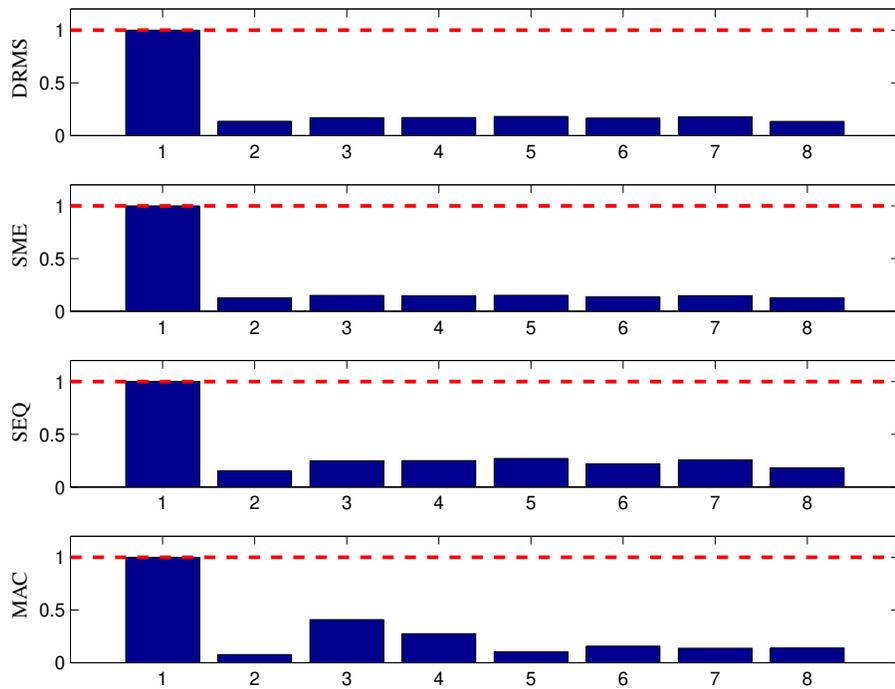


Figura 4.32: Falha de 50% no sensor 1 - filtro de Kalman - resultado experimental.

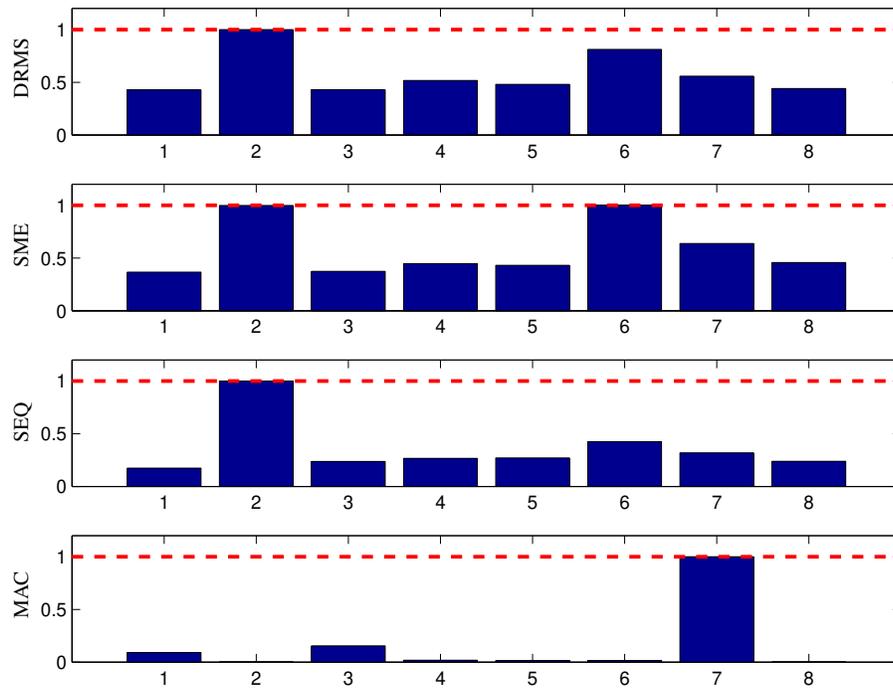


Figura 4.33: Falha de 50% no sensor 2 - filtro de Kalman - resultado experimental.

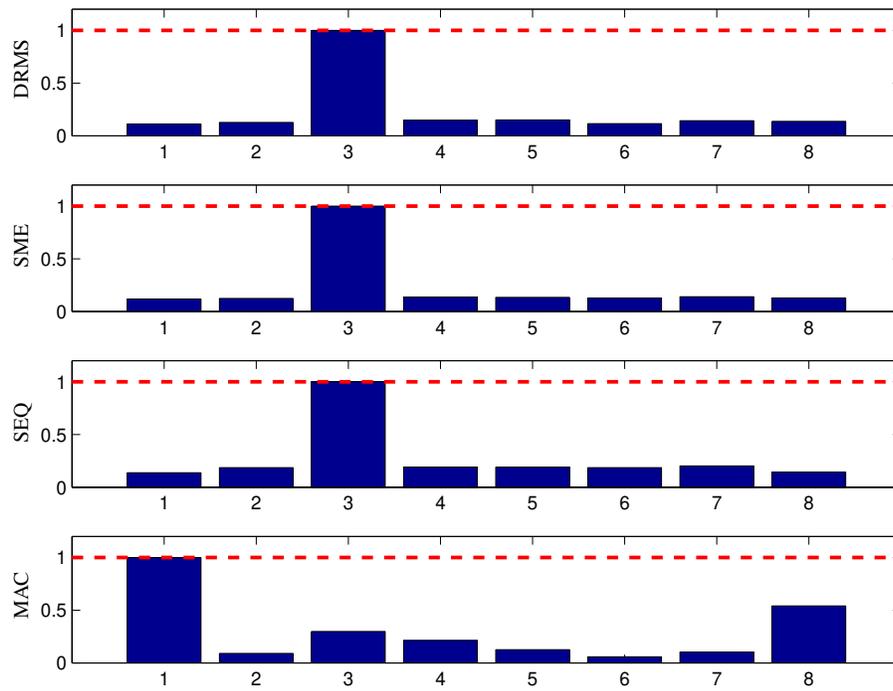


Figura 4.34: Falha de 50% no sensor 3 - filtro de Kalman - resultado experimental.

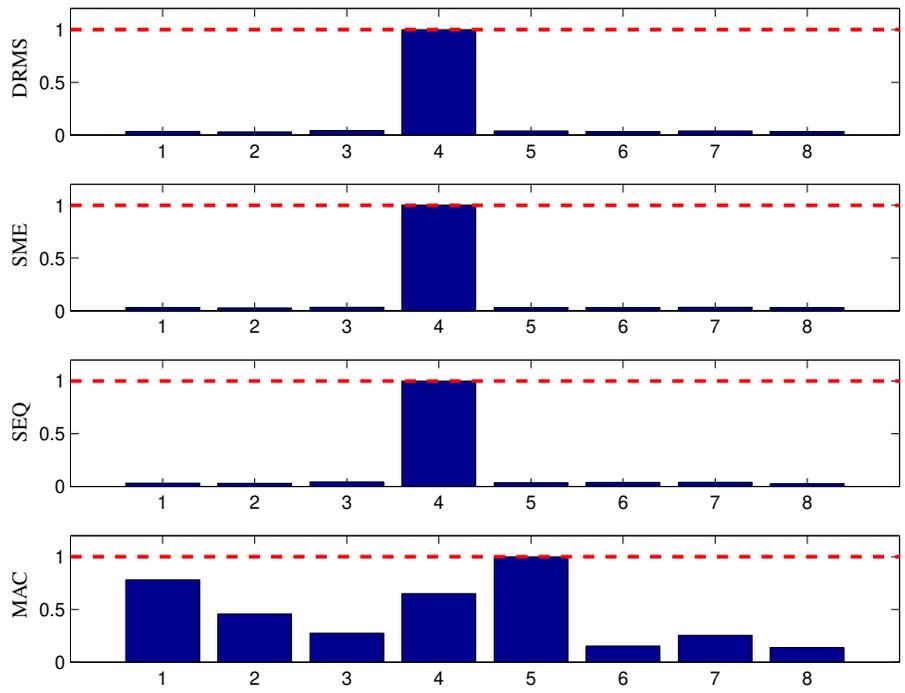


Figura 4.35: Falha de 50% no sensor 4 - filtro de Kalman - resultado experimental.

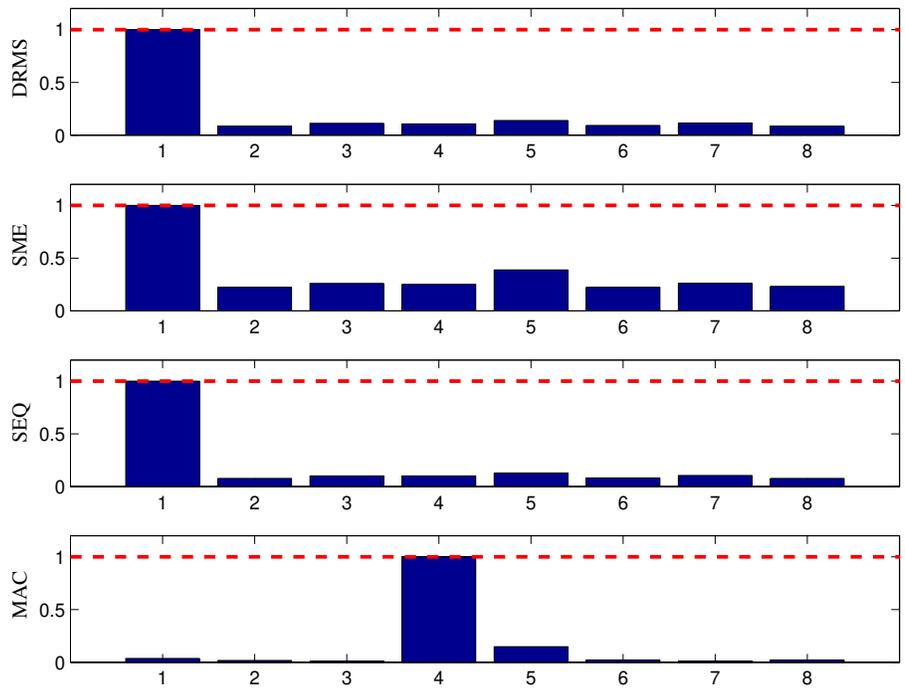


Figura 4.36: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro de Kalman - resultado experimental.

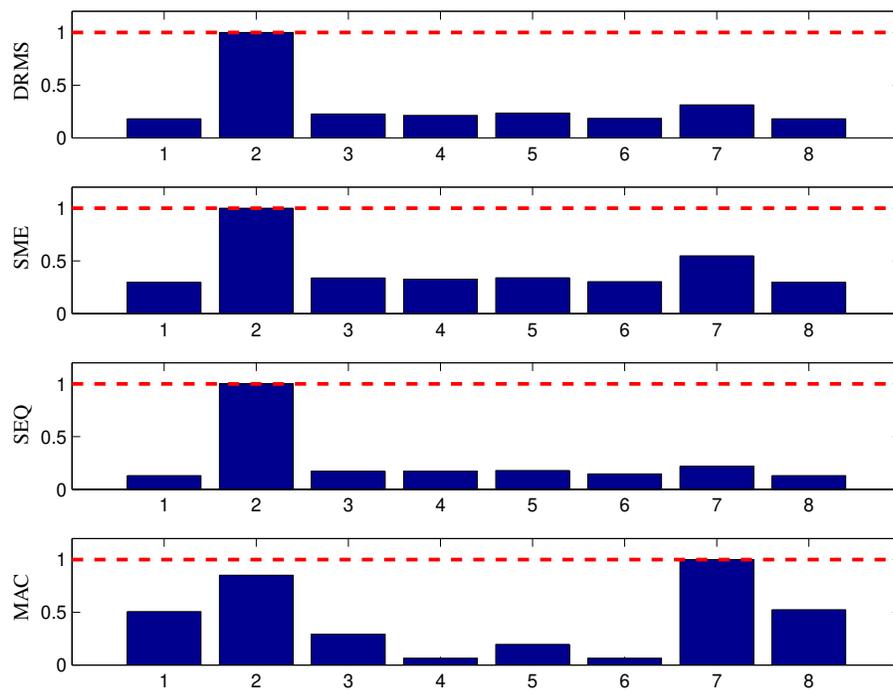


Figura 4.37: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro de Kalman - resultado experimental.

A seguir são sintetizados os resultados dos indicadores usados em conjunto com o filtro de Kalman:

DMRS foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2, 3 e 4, mas nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

SME foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 3 e 4, porém não isolou a falha no sensor 2 e nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

SEQ foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2, 3 e 4, mas nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

MAC foi capaz de isolar apenas a falha no sensor 1.

4.3.3 Detecção de falhas com banco de estimadores - filtro \mathcal{H}_∞

Com o filtro \mathcal{H}_∞ também foram calculados os indicadores a partir das medições com falha de 50% no sensor 1, 50% no sensor 2, 50% no sensor 3, 50% no sensor 4, resultando nos valores apresentados, respectivamente, na Figura 4.38, na Figura 4.39, na Figura 4.40 e na Figura 4.41. Resultados para falhas simultâneas de 50% nos sensores 1 e 5 são apresentados na Figura 4.42 e para falhas simultâneas de 50% nos sensores 2 e 7 na Figura 4.43.

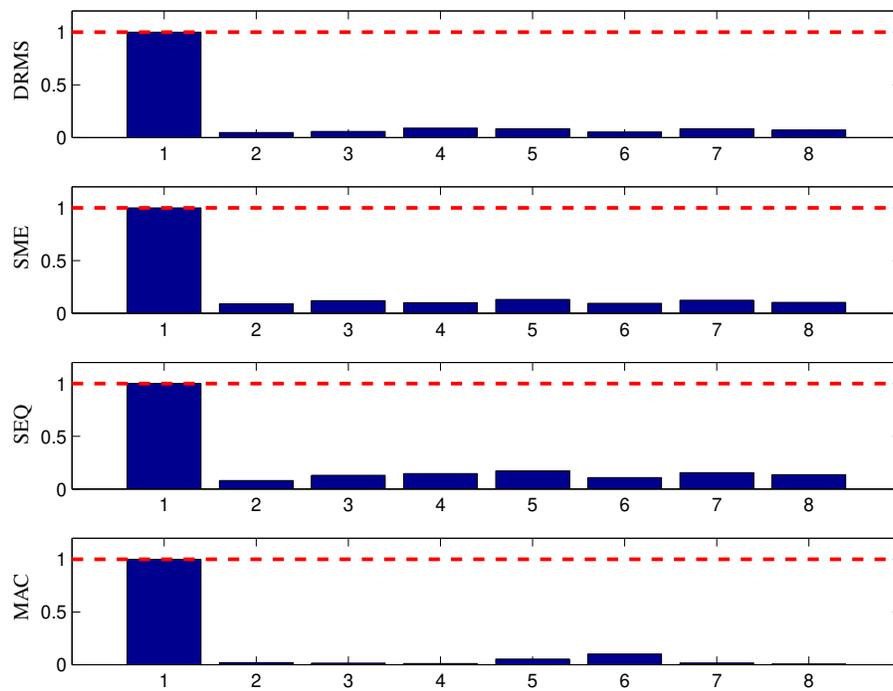


Figura 4.38: Falha de 50% no sensor 1 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

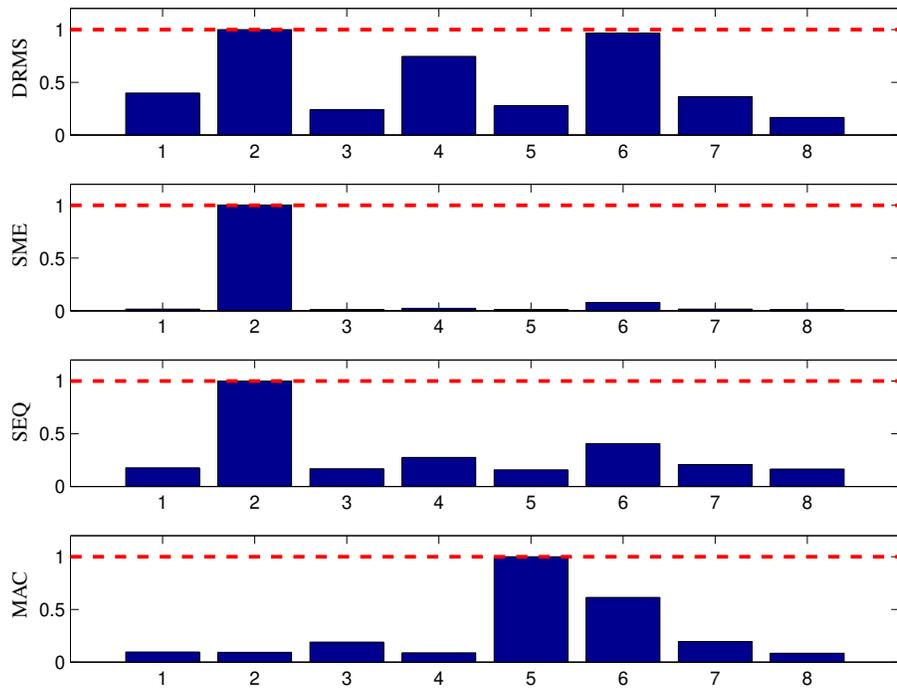


Figura 4.39: Falha de 50% no sensor 2 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

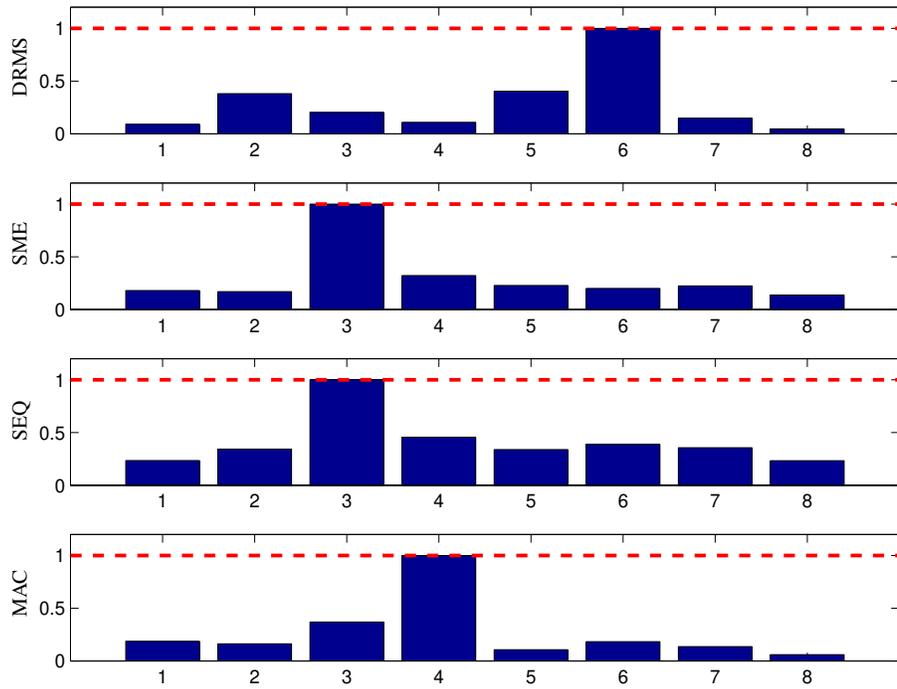


Figura 4.40: Falha de 50% no sensor 3 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

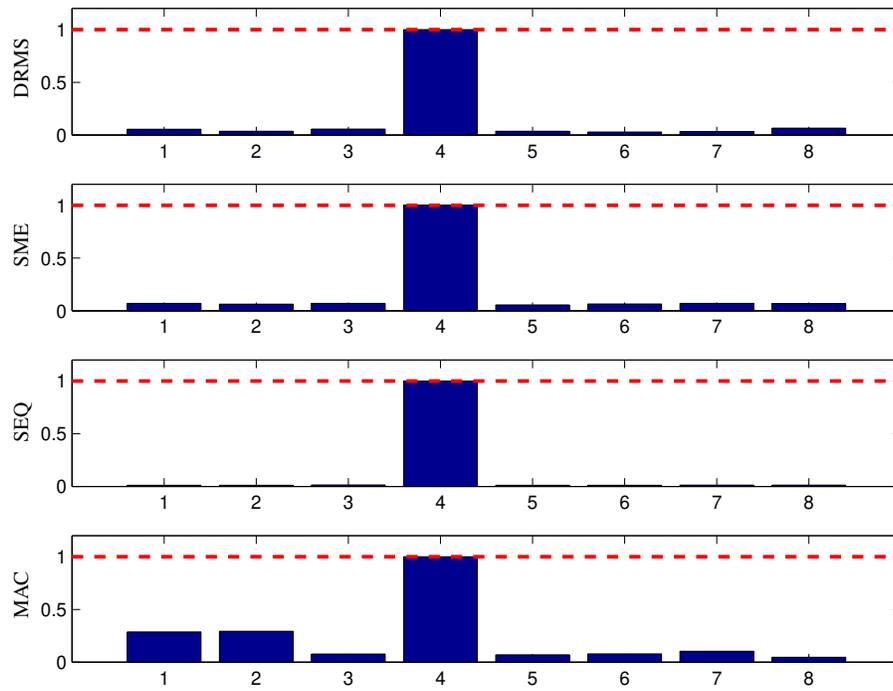


Figura 4.41: Falha de 50% no sensor 4 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

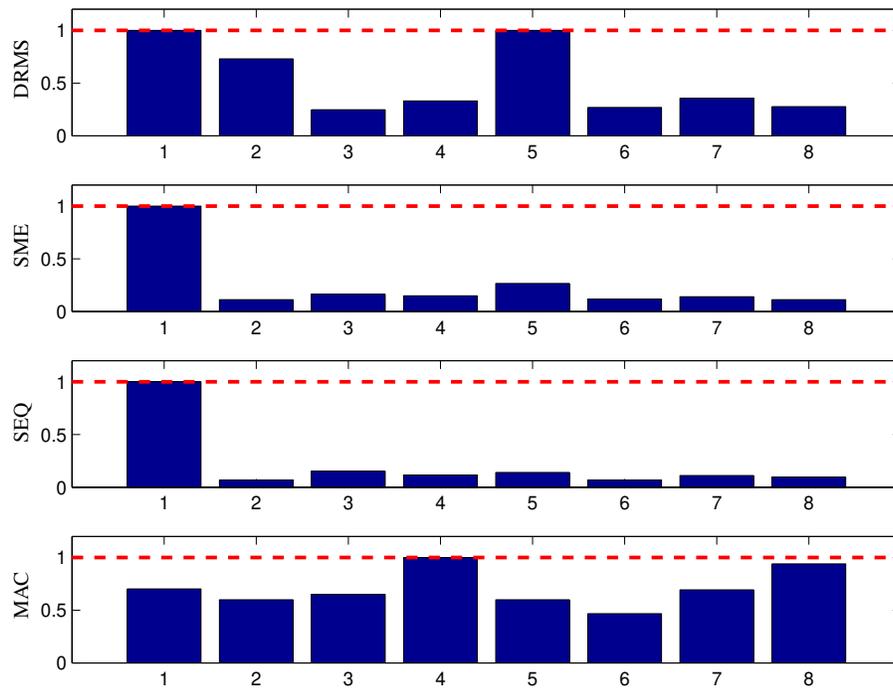


Figura 4.42: Falha simultânea de 50% nos sensores 1 e 5 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

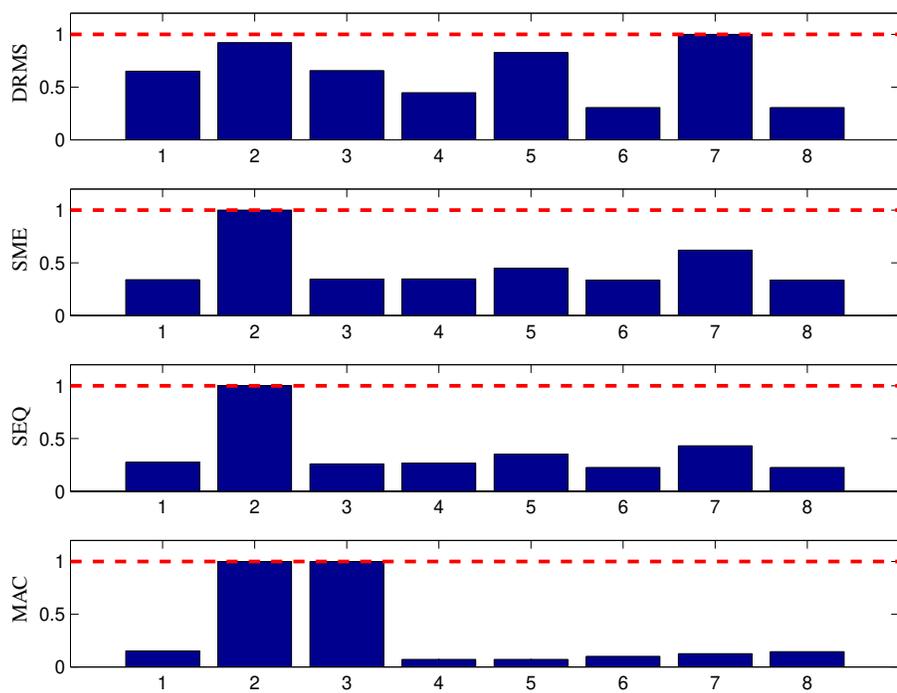


Figura 4.43: Falha simultânea de 50% nos sensores 2 e 7 - filtro \mathcal{H}_∞ - resultado experimental.

A seguir são sintetizados os resultados dos indicadores usados em conjunto com o filtro de \mathcal{H}_∞ :

DMRS foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2 e 4, não foi capaz de isolar a falha no sensor 3. Nas falhas simultâneas, isolou as falhas nos sensores 1 e 5; com relação às falhas nos sensores 2 e 7, isolou a falha no sensor 7 e forneceu valor bem próximo de um para o sensor 2.

SME foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2, 3 e 4, mas nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

SEQ foi capaz de isolar as falhas nos sensores 1, 2, 3 e 4, mas nas falhas simultâneas isolou a falha em apenas um dos sensores.

MAC foi capaz de isolar apenas as falhas nos sensores 1 e 4.

4.3.4 Comentários

O único indicador que mostrou robustez foi o SEQ, tendo isolado bem todas as falhas não simultâneas de sensor, independentemente do estimador utilizado no banco. Com o estimador \mathcal{H}_∞ , o indicador SME também foi capaz de isolar as falhas simples. O indicador MAC foi o que apresentou os piores resultados, comprovando o que sugeriam as simulações com modelos numéricos da placa. O indicador DRMS foi o mais inconstante, fracassou em algumas situações mas isolou as falhas simultâneas nos sensores 1 e 5 quando usado em conjunto com filtro \mathcal{H}_∞ .

A Tabela 4.10 facilita a comparação dos resultados experimentais. Nela fica mais claro que o indicador SEQ foi capaz de detectar todas as falhas não simultâneas, independentemente do estimador utilizado. Comparando-se os estimadores, percebe-se que o estimador \mathcal{H}_∞ foi

aquele que obteve um maior número de sucessos enquanto o observador de saída apresentou o maior número de fracassos.

Tabela 4.10: Comparação dos resultados obtidos nos testes experimentais.

(a) Observador de saída				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✗
y_2	✓	✗	✓	✗
y_3	✗	✓	✓	✗
y_4	✓	✓	✓	✓
y_1 e y_5	±	±	±	✗
y_2 e y_7	±	±	±	±

(b) Filtro de Kalman				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✓
y_2	✓	✗	✓	✗
y_3	✓	✓	✓	✗
y_4	✓	✓	✓	✗
y_1 e y_5	±	±	±	✗
y_2 e y_7	±	±	±	±

(c) Filtro \mathcal{H}_∞				
Sensor	DRMS	SME	SEQ	MAC
y_1	✓	✓	✓	✓
y_2	✓	✓	✓	✗
y_3	✗	✓	✓	✗
y_4	✓	✓	✓	✓
y_1 e y_5	✓	±	±	✗
y_2 e y_7	±	±	±	✗

✓ indica sucesso, ✗ indica fracasso e ± indica sucesso parcial.

4.4 Indicador Produto

Apesar de o indicador SEQ ter se mostrado robusto, é interessante avaliar alternativa-mente a aplicabilidade do Indicador Produto. Assim, esse indicador foi calculado para os dados experimentais e os resultados obtidos com os estimadores observador de saída, filtro de Kalman

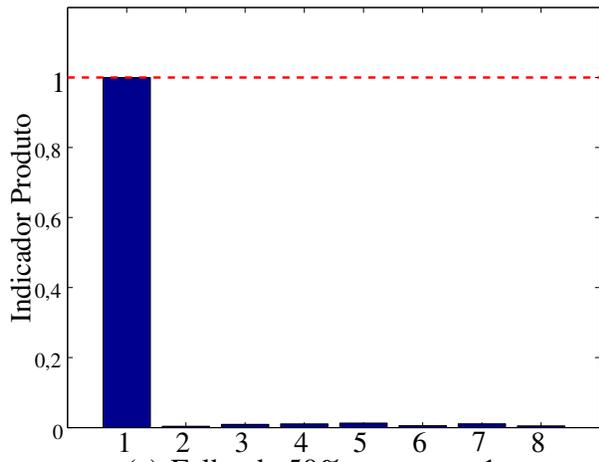
e filtro \mathcal{H}_∞ estão reportados na Figura 4.44, na Figura 4.45 e na Figura 4.46, respectivamente.

O Indicador Produto permitiu o isolamento de todas as falhas não simultâneas, independentemente do estimador utilizado no banco. Entretanto falhas no sensor 3 resultaram em indicadores significativamente abaixo do valor unitário quando usados os estimadores observador de saída e filtro \mathcal{H}_∞ . É possível notar ainda que o estimador \mathcal{H}_∞ garantiu maior sensibilidade às falhas simultâneas, apesar de isolar claramente apenas uma das falhas.

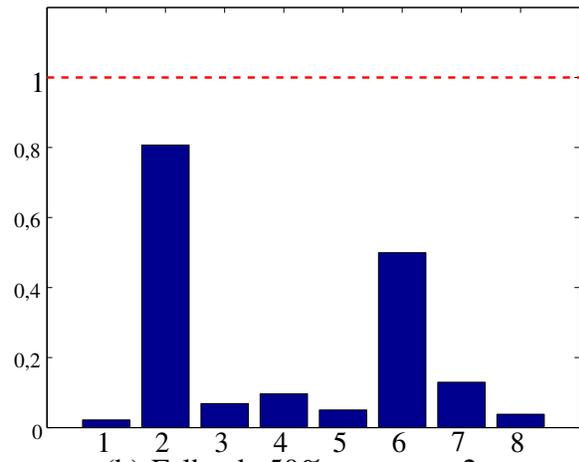
4.5 Comentário gerais sobre os resultados

A única combinação estimador/indicador que funcionou bem para todas simulações e experimentos de falhas (não simultâneas) foi o observador de saída com o indicador SEQ. A observação das tabelas 4.4, 4.8 e 4.10 facilita essa análise. Com filtro \mathcal{H}_∞ , houve um elevado índice de acerto o indicador SEQ, entretanto com o modelo identificado experimentalmente fracassou no isolamento da falha do sensor 8.

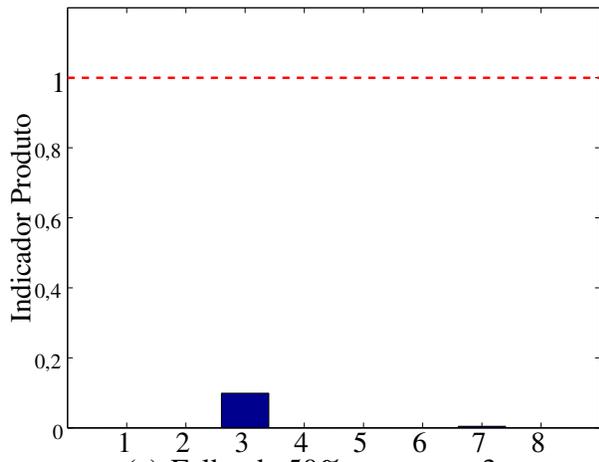
O Apêndice A dessa tese mostra alguns resultados obtidos a partir de simulações com falhas multiplicativas mais severas e também com medições mais ruidosas. Mesmo nessas condições mais desfavoráveis os resultados mostraram-se consistentes.



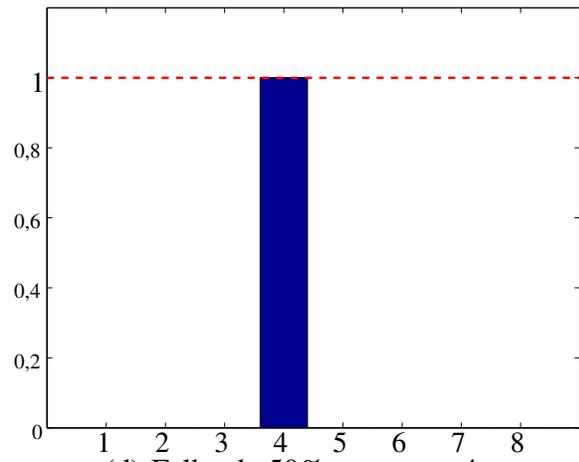
(a) Falha de 50% no sensor 1.



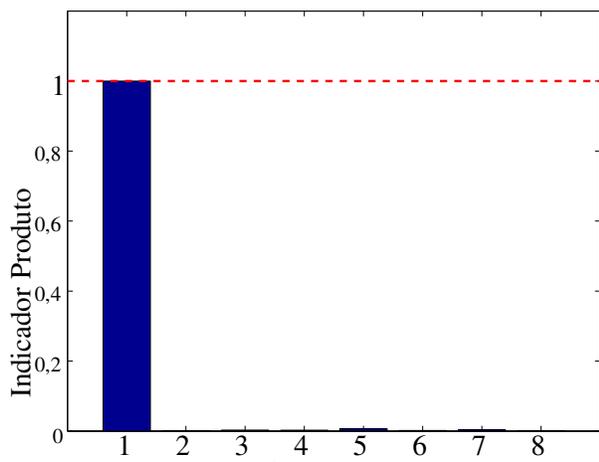
(b) Falha de 50% no sensor 2.



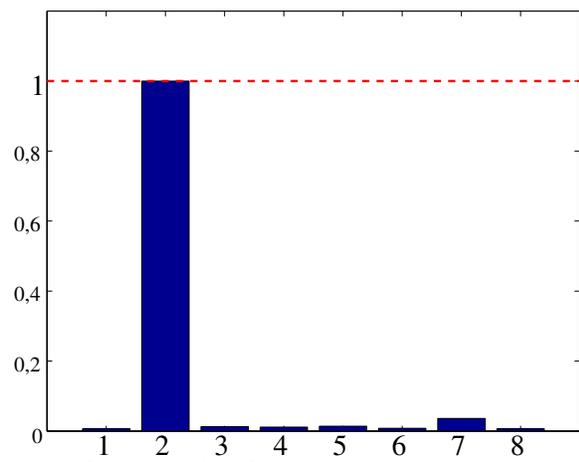
(c) Falha de 50% no sensor 3.



(d) Falha de 50% no sensor 4.



(e) Falha de 50% no sensores 1 e 5.



(f) Falha de 50% no sensores 2 e 7.

Figura 4.44: Indicador Produto - observador de saída.

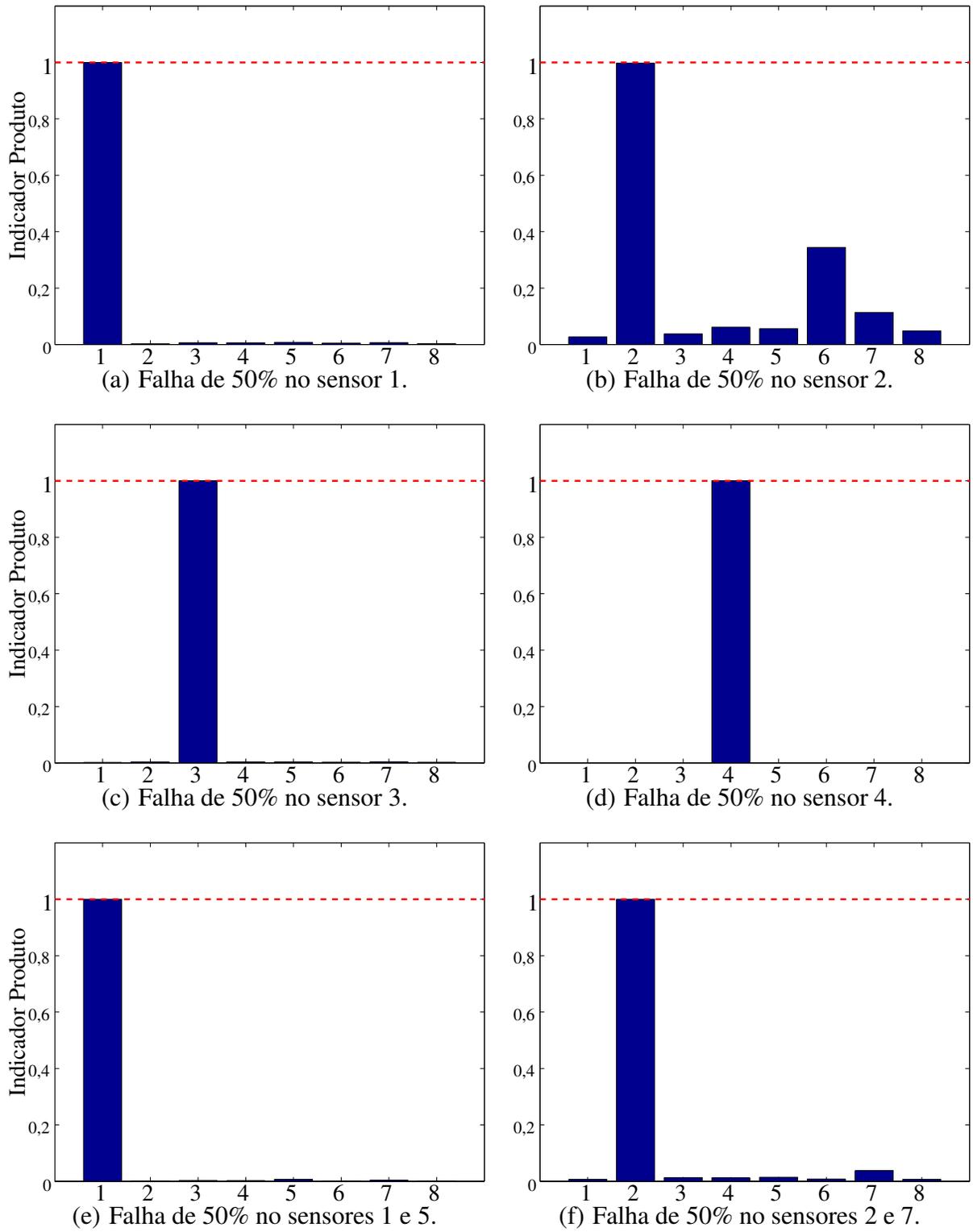


Figura 4.45: Indicador Produto - filtro de Kalman.

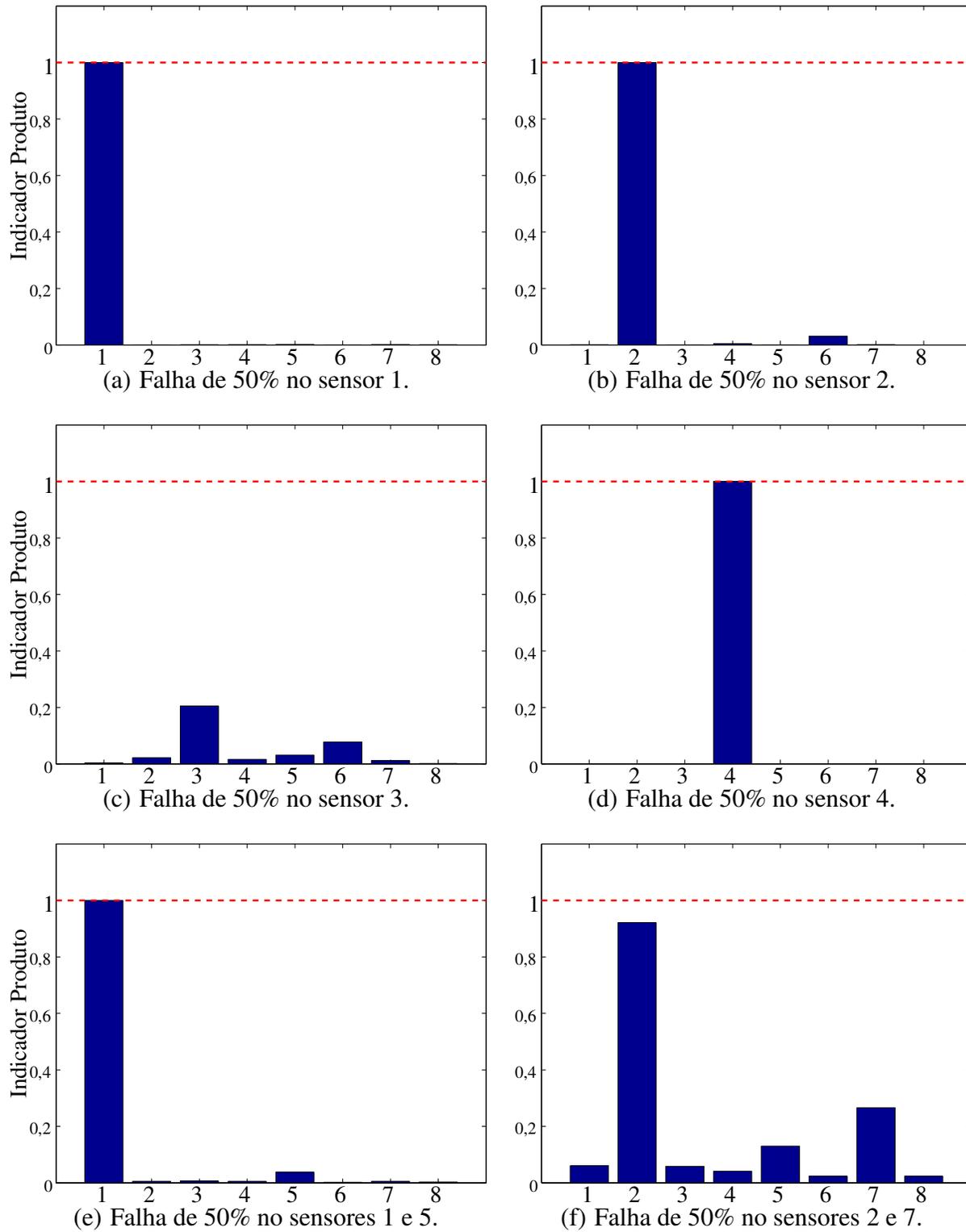


Figura 4.46: Indicador Produto - filtro \mathcal{H}_∞ .

5 CONCLUSÃO

O problema de Validação de Sensores em sistemas realimentados foi tratado sob o ponto de vista de FDI, onde normalmente se trabalha com malhas de controle. Foi empregado um esquema com bancos de estimadores para a geração de resíduos de tal forma que cada elemento do banco é responsável por monitorar falhas em um sensor específico. Foram avaliados diferentes estimadores: observadores de saída, filtros de Kalman e filtros \mathcal{H}_∞ .

Para quantificar os resíduos produzidos no banco de estimadores foram usados indicadores, obtidos pela razão entre índice calculado para cada sinal de resíduo e um índice de referência previamente determinado para uma condição sem falha. Desse modo, indicadores com valores diferentes da unidade sugerem a ocorrência de falha. Com esse intuito alguns indicadores bem conhecidos foram adaptados e utilizados em conjunto com os bancos de estimadores: Diferença RMS (DRMS), Soma do Módulo do Erro (SME), Soma do Erro ao Quadrado (SEQ) e *Modal Assurance Criterion* (MAC). A adaptação proposta para os indicadores clássicos foi a seguinte: cálculo de norma euclidiana dos indicadores, que permite a obtenção de uma grandeza escalar associada a cada sensor monitorado, e posterior reescalamiento, que facilita a percepção visual da falha nos gráficos apresentados. Além disso, foi proposto um indicador combinado, denominado Indicador Produto, composto pelo produto dos indicadores DRMS, SME e SEQ reescalados. Como os indicadores clássicos adaptados fracassaram em algumas situações, o Indicador Produto foi proposto pensando no fato de que o fracasso de um indicador pode ser superado pelo sucesso dos outros. O reescalamiento e o Indicador Produto foram contribuições desse trabalho.

A tese foi construída a partir da premissa central de que detectar falhas de sensores em estruturas com Controle Ativo de Vibração é uma tarefa difícil e pouco abordada na literatura.

O controle ativo atenua o efeito das falhas e por isso dificulta a detecção. Sendo assim, o esquema de detecção de falhas proposto, com banco de estimadores e indicadores especializados, foi aplicado a uma Estrutura Inteligente, do tipo placa, na presença de Controle Ativo de Vibração. Foi usado controlador \mathcal{H}_∞ e as falhas de sensor foram do tipo multiplicativa, que na prática podem estar associadas a erros de calibração. Foram realizadas simulações com um modelo de elementos finitos de uma placa e também com um outro modelo de placa identificado experimentalmente. Também foram realizados testes na bancada experimental. Essas simulações e testes experimentais permitiram a validação do método.

Assim, foi possível chegar à principal contribuição do trabalho: o esquema de banco de estimadores com observadores de saída, quando usado em conjunto com o indicador SEQ reescalado ou Indicador Produto, é capaz de isolar muito bem falhas não simultâneas de sensores. O observador de saída é um estimador simples e sua aplicabilidade em casos práticos, propiciada pelo uso do indicador SEQ reescalado ou Indicador Produto, mostra-se uma vantagem diante da maior complexidade de projeto dos filtros de Kalman e \mathcal{H}_∞ . Apesar da presença do controlador de vibração, que atenua os efeitos das falhas, os resultados foram satisfatórios.

De forma mais específica, também foi possível concluir que:

- O trabalho Abdelghani e Friswell (2007), usando filtragem modal, e o trabalho Kerschen *e outros* (2005), usando análise de componentes principais (PCA), são excelentes referências sobre Validação de Sensores. O método de Abdelghani e Friswell (2007) não funcionou em malha fechada nas simulações realizadas com estrutura modelada pelo método dos elementos finitos. O método de Kerschen *e outros* (2005) funcionou bem em malha fechada quando aplicado à estrutura modelada pelo método dos elementos finitos, entretanto mostrou resultados inferiores àqueles do esquema com bancos de estimadores e indicadores.

- Os seguintes estimadores de saída podem ser usados para detecção de falhas de sensores em estruturas flexíveis: observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ . Simulações com o modelo de elementos finitos e com o modelo identificado experimentalmente, além de testes experimentais, comprovaram a validade desses estimadores quando usados em conjunto com indicadores apropriados. O estimador filtro \mathcal{H}_∞ possui intrínseca robustez aos distúrbios de atuação e aos ruídos de medição, entretanto na prática essa robustez somente é atingida mediante correta seleção das funções de ponderação utilizadas durante o projeto dos estimadores. Nessa tese, no projeto dos bancos de estimadores \mathcal{H}_∞ as funções de ponderação foram iterativamente ajustadas mas possivelmente uma seleção mais meticulosa poderia levar a melhores resultados. O estudo desse problema é uma extensão natural para o aperfeiçoamento do método e poderá ser abordado em trabalhos futuros. A robustez a incertezas de modelagem também poderia ser abordada nesse caminho.
- Os seguintes indicadores, em suas versões adaptadas, podem ser usados: diferença RMS (DRMS), soma do módulo do erro (SME), soma do erro ao quadrado (SEQ) e *modal assurance criterion* (MAC). Entretanto o indicador SEQ mostrou-se mais robusto nos testes experimentais. O Indicador Produto proposto também funcionou relativamente bem nos testes experimentais, principalmente em conjunto com o filtro de Kalman. Apesar desses indicadores terem permitido o correto isolamento da falha, não é possível determinar o grau de severidade, o que também seria desejável no esquema de detecção de falhas. Uma possibilidade para o tratamento dessa limitação seria a incorporação de níveis adicionais ao banco de estimadores, de modo que os níveis fossem responsáveis por monitorar severidades específicas das falhas.

Nessa tese trabalhou-se apenas com falha multiplicativa, um tipo de falha que a literatura diz ser de difícil detecção, quando comparada com falha aditiva ou falha completa. Entretanto, esse é um tipo de falha muito específico. O ideal seria que o método de detecção fosse

sensível também a outros tipos de falha, como ruptura parcial ou descolagem, comuns em sensores piezelétricos. Além disso, falhas de sensores não podem ser confundidas com falhas de atuadores ou danos estruturais, como trincas ou corrosão. A técnica proposta na tese não garante essa diferenciação entre falhas de sensores e falhas nos outros elementos da Estrutura Inteligente. Numa tentativa de superar essa limitação, o esquema de banco de estimadores poderia ser construído, por exemplo, com níveis adicionais para o monitoramento de falhas de atuadores ou de danos estruturais. Cada novo elemento do banco seria responsável por falha em um atuador específico ou dano em uma região específica da estrutura. Sugere-se que esse tópico seja abordado em pesquisas futuras.

O isolamento de falhas simultâneas foi abordado fazendo-se cada elemento do banco de estimadores monitorar conjuntos de falhas, cada conjunto composto de uma possível combinação de falhas. Nas simulações com o modelo de elementos finitos houve sucesso no isolamento de falhas simultâneas porém com a planta identificada e nos testes experimentais o resultado foi insatisfatório. Para o caso de duas falhas simultâneas, apenas uma delas foi corretamente isolada. Em grandes estruturas, com elevado número de sensores, todas as vantagens da Validação de Sensores somente serão usufruídas se o método for capaz de detectar e isolar todas as falhas simultâneas. Avaliar esse problema e aperfeiçoar a técnica aqui proposta é um tema de interesse para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABDELGHANI, M. e FRISWELL, M.I. Sensor validation for structural systems with multiplicative sensor faults. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 21, n. 1, 270 – 279, 2007.

ALLEMANG, R.J. The modal assurance criterion - twenty years of use and abuse. **Sound and Vibration**, v. 37, n. 8, 14–23, 2003.

ASTROM, K.J. e MURRAY, R.M. **Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers**. Princeton University Press, 2008.

BOYD, S.; EL GHAOU, L.; FERON, E. e BALAKRISHNAN, V. **Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory**, v. 15 de *Studies in Applied Mathematics*. SIAM, Philadelphia, PA, junho 1994.

CHEN, J. e PATTON, R.J. **Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems**. Kluwer Academic Publishers, 1999.

CHOPRA, I. Review of state of art of smart structures and integrated systems. **AIAA Journal**, v. 40, n. 11, 2002.

DA SILVA, Samuel. **Deteção de danos estruturais usando análise de séries temporais e atuadores e sensores piezelétricos**. 2008. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.

DING, S.X. **Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms and Tools**. Springer, 2008.

DUNIA, R.; QIN, S.J.; EDGAR, T.F. e MCAVOY, T.J. Use of principal component analysis for sensor fault identification. **Computers & Chemical Engineering**, v. 20, Supplement 1, n. 0, 1996.

FARRAR, C.R. e WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 365, n. 1851, 303–315, 2007.

FERREIRA, A.J.M. **MATLAB Codes for Finite Element Analysis**. Springer, 2009.

FRANK, P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - A survey and some new results. **Automatica**, v. 26, n. 3, 459–474, 1990.

FRANKLIN, G.F.; POWEL, J.D. e WORKMAN, M.L. **Digital Control of Dynamic Systems**. Addison Wesley Longman, 1998.

FRISWELL, M.I. e INMAN, D.J. Sensor Validation for Smart Structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 10, n. 12, 973–982, 1999.

GAWRONSKI, W.K. **Advanced structural dynamics and active control of structures**. Springer, 2004.

HURLEBAUS, S. e GAUL, L. Smart structure dynamics. **Mechanical Systems and Signal**

Processing, v. 20, n. 2, 255 – 281, 2006.

HWANG, I.; KIM, S.; KIM, Y. e SEAH, C.E. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 18, n. 3, 636–653, May 2010.

KERSCHEN, G.; BOE, P.D.; GOLINVAL, J.C. e WORDEN, K. Sensor validation using principal component analysis. **Smart Materials and Structures**, v. 14, n. 1, 36, 2005.

KULLAA, J. Sensor validation using minimum mean square error estimation. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 24, 1444–1457, 2010.

KULLAA, J. Distinguishing between sensor fault, structural damage, and environmental or operational effects in structural health monitoring. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, n. 8, 2976 – 2989, 2011.

KULLAA, J. Detection, identification, and quantification of sensor fault in a sensor network. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 40, n. 1, 208 – 221, 2013.

LEW, J.S.; JUANG, J.N. e LONGMAN, R.W. Comparisson of several identification methods for flexible structures. **Journal of Sound and Vibration**, v. 167, 461–480, 1993.

LIU, Z. e MRAD, N. Validation of strain gauges for structural health monitoring with bayesian belief networks. **Sensors Journal, IEEE**, v. 13, n. 1, 400–407, 2013.

MAZONI, A.F.; SERPA, A.L. e DE OLIVEIRA NOBREGA, E.G. **Challenges and paradigms**

in applied robust control, capítulo A decentralized and spatial approach to the robust vibration control of structures. InTech, 2011.

OVERLY, T.; PARK, G.; FARINHOLT, K.M. e FARRAR, C. Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data. **Sensors Journal, IEEE**, v. 9, n. 11, 1414–1421, 2009.

PATTON, R.J. e CHEN, J. Advances in fault diagnosis using analytical redundancy. In **IEE Colloquium on Plant Optimisation for Profit (Integrated operations management and control)**, pp. 6/1–6/12. January 1993.

PATTON, R.J. e CHEN, J. **Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems**. Kluwer Academic Publishers, 1999.

SCHERER, C.; GAHINET, P. e CHILALI, M. Multiobjective output-feedback control via lmi optimization. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 42, n. 7, 896–911, 1997.

SILVA, V.A.D. **Modelo L^AT_EX para a preparação de teses e dissertações da FEM versão 1.4**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Outubro 2012.

SKELTON, R.E.; IWASAKI, T. e GRIGORIADIS, D.E. **A unified algebraic approach to control design**. Taylor & Francis, 1997.

SKOGESTAD, S. e POSTLETHWAITE, I. **Multivariable Feedback Control: Analysis and Design**. John Wiley & Sons, 1996.

YANG, Q.J.; ZHANG, P.Q.; LI, C.Q. e WU, X.P. A system theory approach to multi-input multi-output modal parameters identification methods. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 8, 159–174, 1994.

ZHOU, K.; DOYLE, J.C. e GLOVER, K. **Robust and Optimal Control**. Prentice Hall, 1996.

APÊNDICE A RESULTADOS COM FALHAS SUAVES E MEDIÇÕES RUIDOSAS

Além das falhas de 50% testadas no Capítulo 4, foram testadas falhas mais suaves, de 10%. Além disso, foram realizadas simulações com ruídos mais severos, com razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos mostradas na Tabela A.1, para o caso de simulação com modelo de elementos finitos, e na Tabela A.2, para o caso de simulação com o modelo identificado experimentalmente.

Tabela A.1: Razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - modelo de elementos finitos.

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
27,46%	24,77%	95,94%	14,80%	14,39%	15,05%	14,71%	18,61%

Tabela A.2: Razões entre máximas amplitudes dos ruídos e dos sinais medidos - modelo identificado.

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
12,28%	16,00%	13,88%	32,73%	21,69%	30,69%	44,31%	15,82%

A.1 Detecção de falhas com modelo de Elementos Finitos

Com o modelo de elementos finitos foram simuladas falhas não simultâneas de 10% nos sensores 6 e 4. Para falha de 10% no sensor 6, a partir dos estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ foram calculados os indicadores reescalados apresentados nas figuras A.1, A.2 e A.3. Para falha de 10% no sensor 4, a partir dos mesmos estimadores foram calculados os indicadores reescalados apresentados nas figuras A.4, A.5 e A.6.

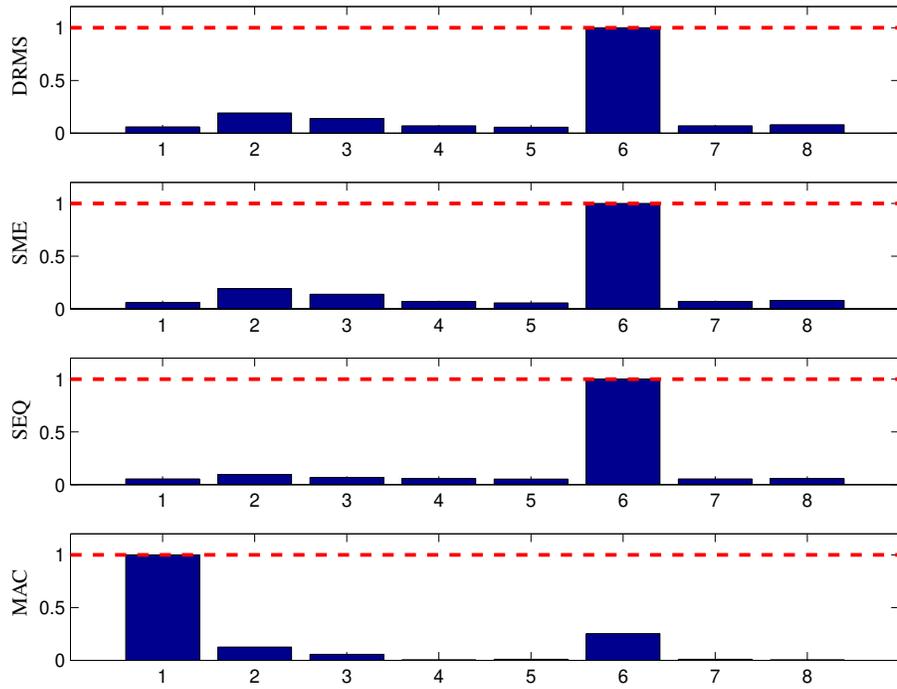


Figura A.1: Falha de 10% no sensor 6 - observador de saída - simulação com modelo de elementos finitos.

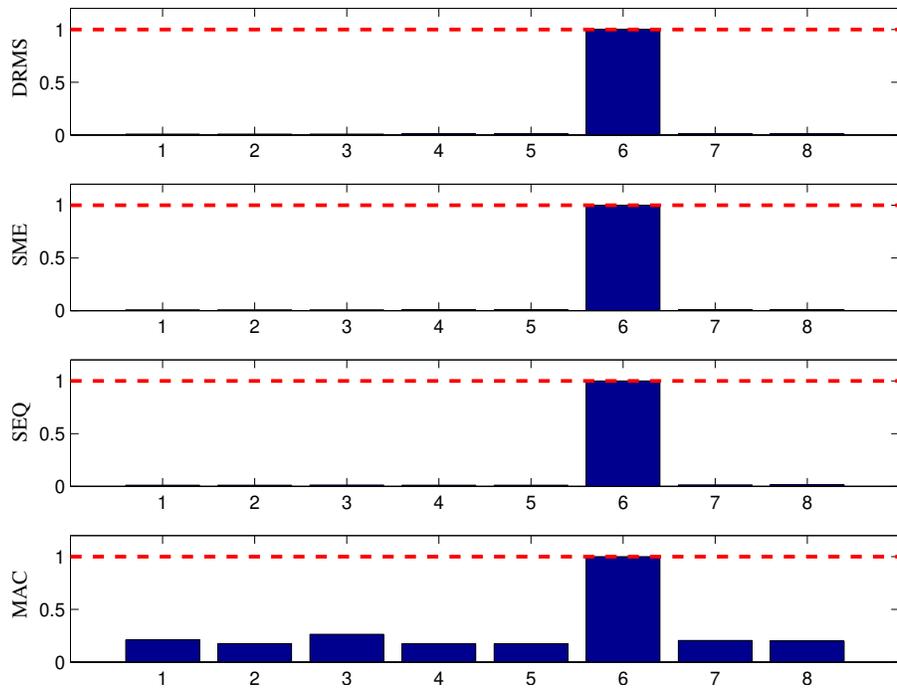


Figura A.2: Falha de 10% no sensor 6 - filtro de Kalman - simulação com modelo de elementos finitos.

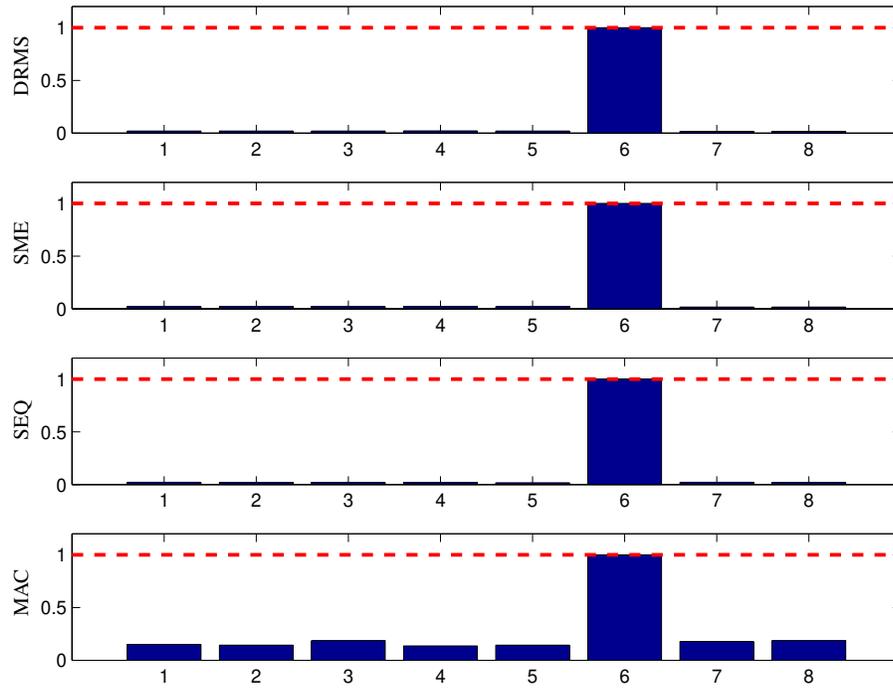


Figura A.3: Falha de 10% no sensor 6 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo de elementos finitos.

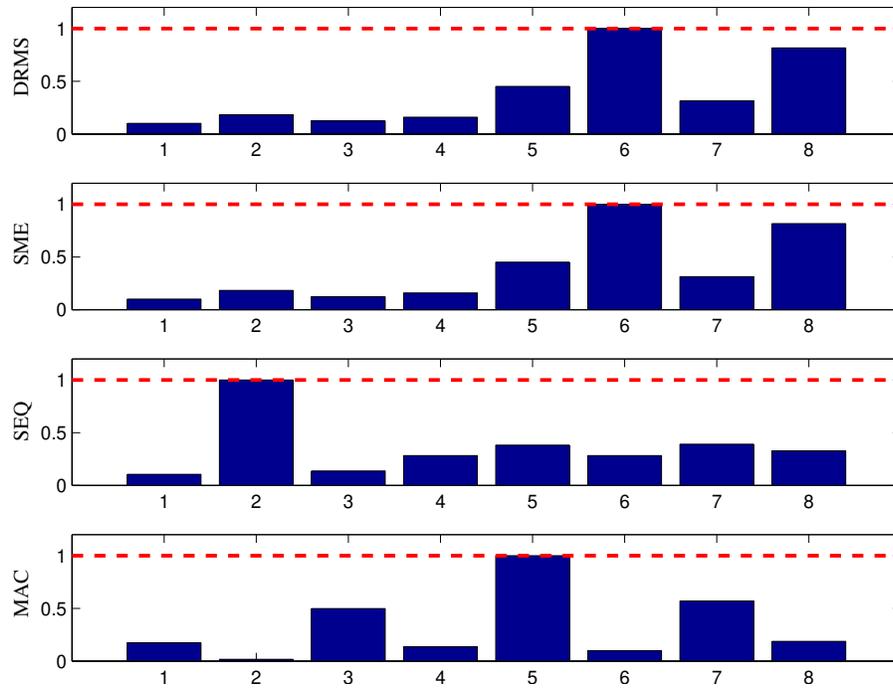


Figura A.4: Falha de 10% no sensor 4 - observador de saída - simulação com modelo de elementos finitos.

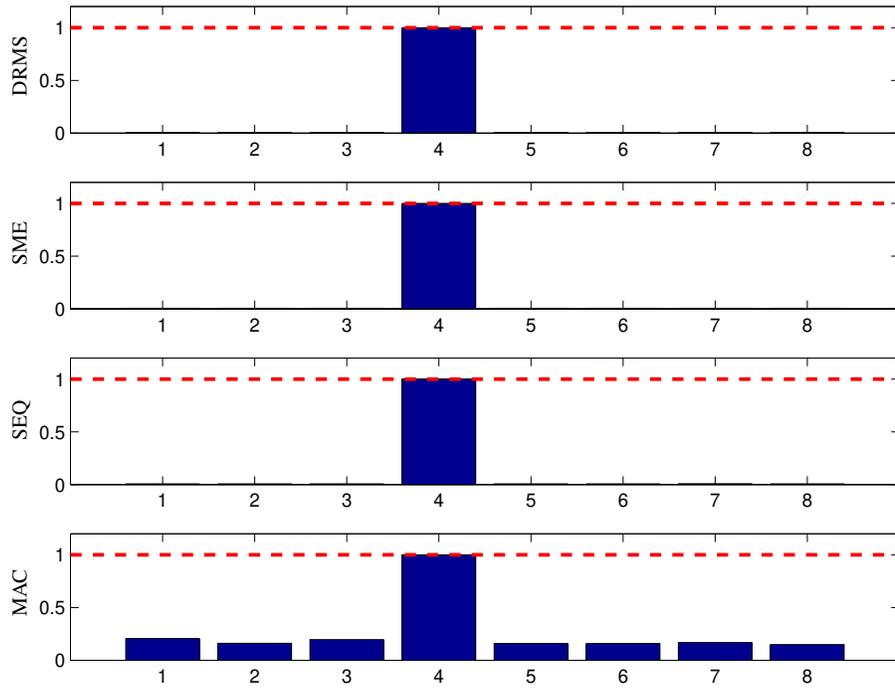


Figura A.5: Falha de 10% no sensor 4 - filtro de Kalman - simulação com modelo de elementos finitos.

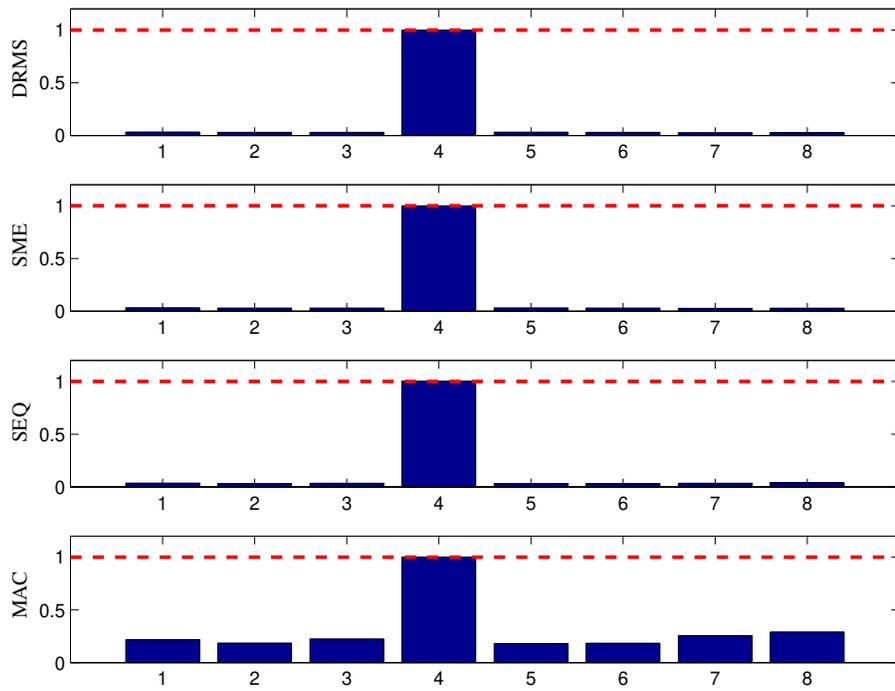


Figura A.6: Falha de 10% no sensor 4 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo de elementos finitos.

A.2 Detecção de falhas com modelo de placa identificado experimentalmente

Com o modelo identificado experimentalmente foram simuladas falhas não simultâneas de 10% nos sensores 3 e 5. Para falha de 10% no sensor 3, a partir dos estimadores observador de saída, filtro de Kalman e filtro \mathcal{H}_∞ foram calculados os indicadores reescalados apresentados nas figuras A.7, A.8 e A.9. Para falha de 10% no sensor 5, a partir dos mesmos estimadores foram calculados os indicadores reescalados apresentados nas figuras A.10, A.11 e A.12.

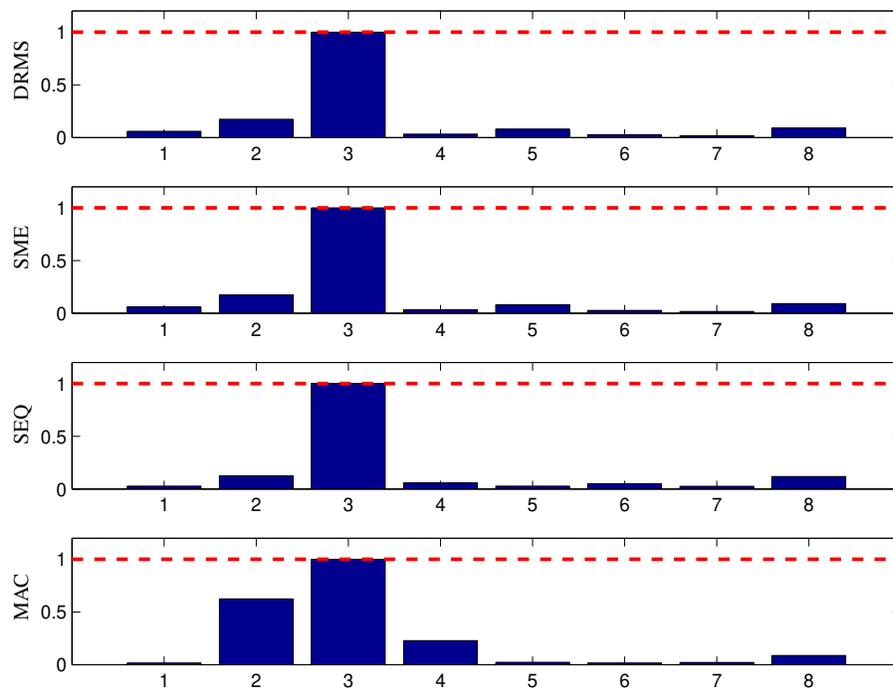


Figura A.7: Falha de 10% no sensor 3 - observador de saída - simulação com modelo identificado experimentalmente.

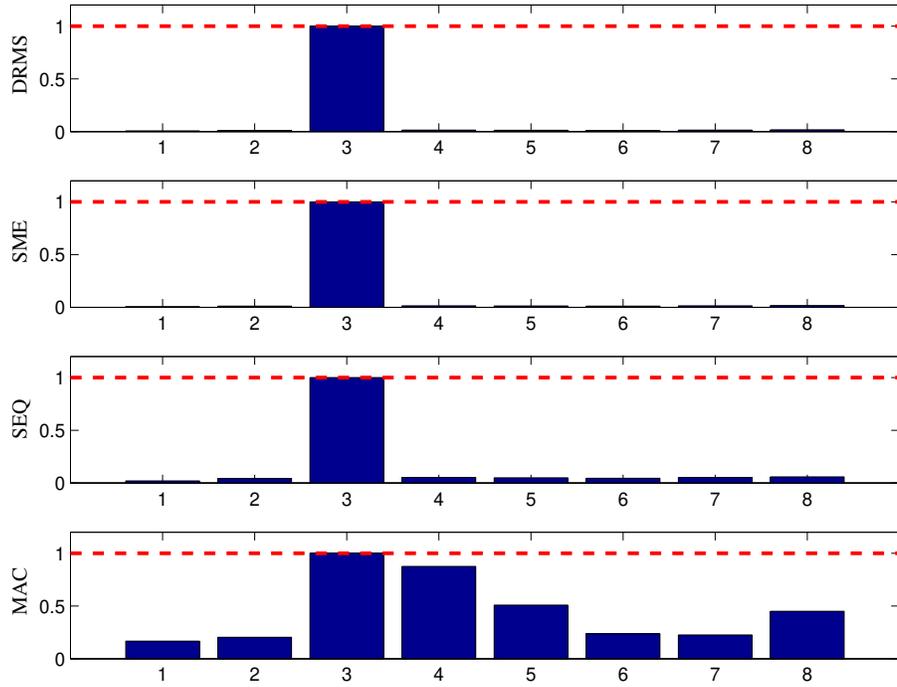


Figura A.8: Falha de 10% no sensor 3 - filtro de Kalman - simulação com modelo identificado experimentalmente.

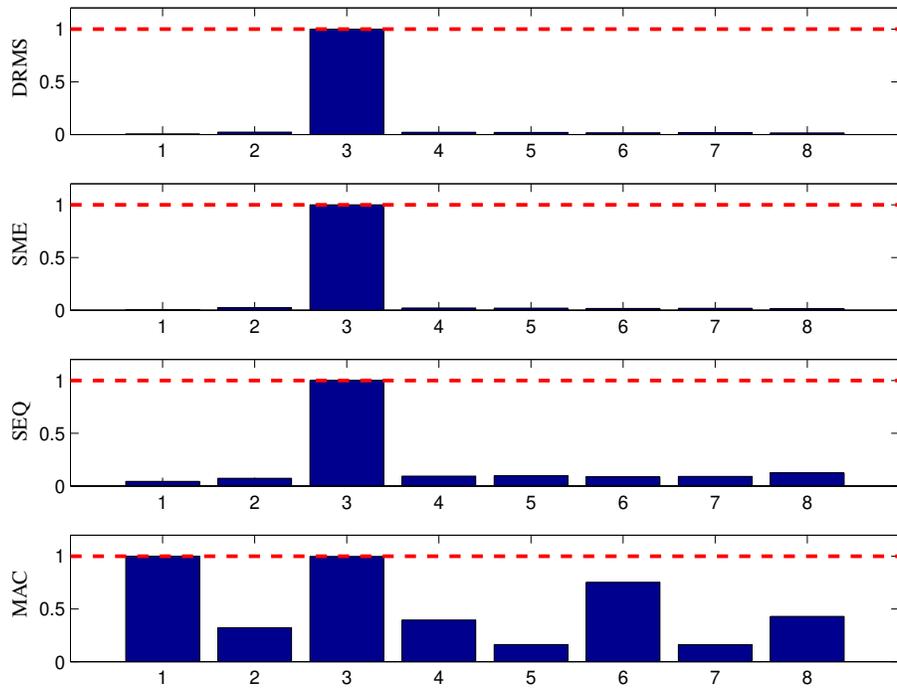


Figura A.9: Falha de 10% no sensor 3 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo identificado experimentalmente.

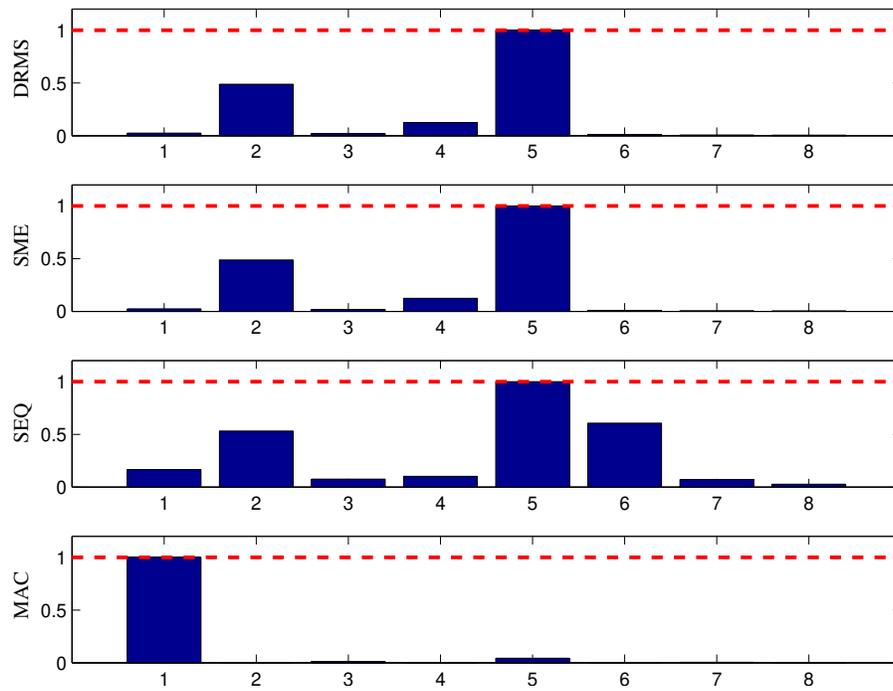


Figura A.10: Falha de 10% no sensor 5 - observador de saída - simulação com modelo identificado experimentalmente.

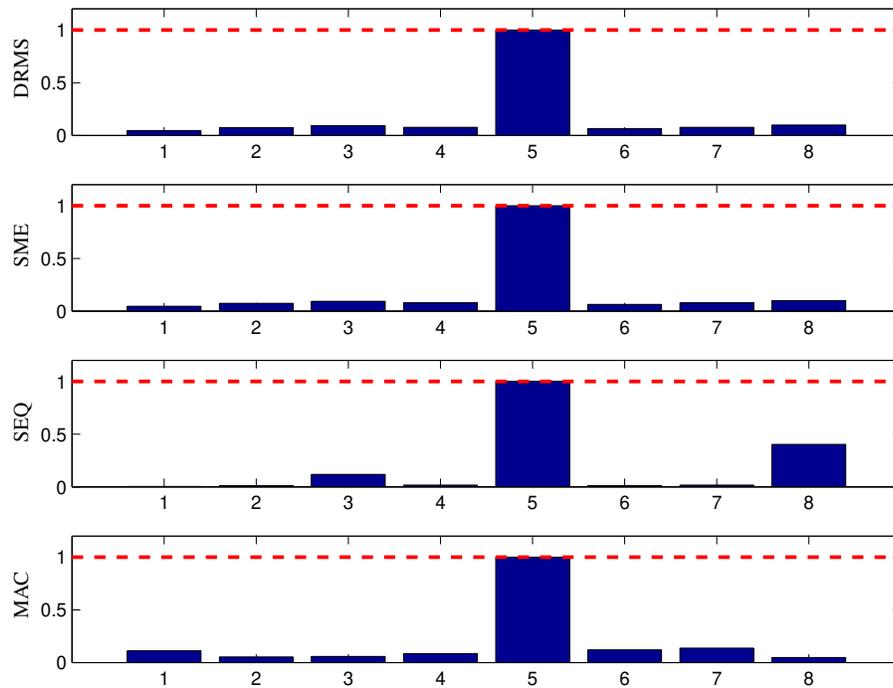


Figura A.11: Falha de 10% no sensor 5 - filtro de Kalman - simulação com modelo identificado experimentalmente.

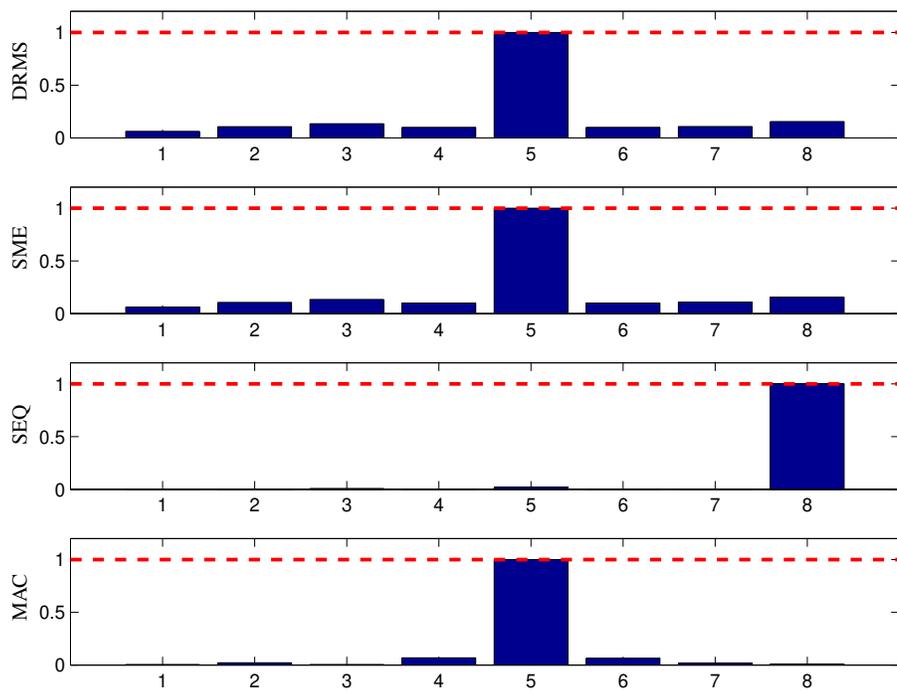


Figura A.12: Falha de 10% no sensor 5 - filtro \mathcal{H}_∞ - simulação com modelo identificado experimentalmente.

APÊNDICE B NORMA \mathcal{H}_∞ E PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO COM RESTRIÇÃO LMI

Seja um sistema dado pelo modelo de estados

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bw(t), \quad (\text{B.1})$$

$$z(t) = Cx(t) + Dw(t). \quad (\text{B.2})$$

Este sistema possui a matriz de transferência entre a entrada $w(t)$ e a saída $z(t)$ dada por

$$\frac{Z(s)}{W(s)} = H(s) = C(sI - A)^{-1}B + D.$$

É possível escrever que

$$\|H(s)\|_\infty^2 = \lambda_{\max}(H^*(jw)H(jw)),$$

ou ainda,

$$\|H(s)\|_\infty^2 = \max \frac{W^*(jw)H^*(jw)H(jw)W(jw)}{W(jw)^*W(jw)} = \max \frac{Z^*(jw)Z(jw)}{W(jw)^*W(jw)} \geq \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2},$$

onde foi usada a definição de norma \mathcal{L}_2 .

Considere que $\|H(s)\|_\infty < \gamma$. Conseqüentemente é possível escrever que (ZHOU e outros, 1996)

$$\frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} < \gamma^2 \Rightarrow z'(t)z(t) - \gamma^2 w'(t)w(t) < 0. \quad (\text{B.3})$$

Do critério de estabilidade de Lyapunov escreve-se que

$$\dot{x}'Px + x'P\dot{x} < 0. \quad (\text{B.4})$$

Combinando (B.3) e (B.4) tem-se

$$\dot{x}'Px + x'P\dot{x} + z'z - \gamma^2 w'w < 0. \quad (\text{B.5})$$

Substituindo as equações de estado (B.1) e (B.2) em (B.5) escreve-se que

$$(Ax + Bw)'Px + x'P(Ax + Bw) + (Cx + Dw)'(Cx + Dw) - \gamma^2 w'w < 0,$$

que pode ser escrita matricialmente como

$$\begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} A'P + PA + C'C & PB + C'D \\ B'P + D'C & -\gamma^2 + D'D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} < 0,$$

e que leva à seguinte condição matricial

$$\begin{bmatrix} A'P + PA + C'C & PB + C'D \\ B'P + D'C & -\gamma^2 + D'D \end{bmatrix} < 0,$$

ou também

$$\begin{bmatrix} A'P + PA & PB \\ B'P & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < - \begin{bmatrix} C' \\ D' \end{bmatrix} [C \ D]. \quad (\text{B.6})$$

Aplicando o complemento de Schur (BOYD e outros, 1994) em (B.6) tem-se

$$\left[\begin{array}{cc|c} A'P + PA & PB & C' \\ B'P & -\gamma^2 I & D' \\ \hline C & D & -I \end{array} \right] < 0. \quad (\text{B.7})$$

É possível aplicar a seguinte transformação de congruência (SCHERER *e outros*, 1997)

em (B.7):

$$\begin{bmatrix} \gamma^{-1}I & 0 & 0 \\ 0 & \gamma^{-1}I & 0 \\ 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'P + PA & PB & C' \\ B'P & -\gamma^2 I & D' \\ C & D & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma^{-1}I & 0 & 0 \\ 0 & \gamma^{-1}I & 0 \\ 0 & 0 & \gamma I \end{bmatrix} < 0,$$

cujo resultado é

$$\begin{bmatrix} A'\bar{P} + \bar{P}A & \bar{P}B & C' \\ B'\bar{P} & -I & D' \\ C & D & -\mu I \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{B.8})$$

com $\bar{P} = \mu^{-1}P$ e $\mu = \gamma^2$.

O problema de cálculo da norma \mathcal{H}_∞ pode ser então colocado como um problema de otimização da seguinte forma

$$\begin{aligned} \min \quad & \mu \\ \text{sujeito a} \quad & (\text{B.8}) \\ & \bar{P} > 0. \end{aligned}$$

APÊNDICE C FILTROS DE PONDERAÇÃO NO PROBLEMA DE CONTROLE \mathcal{H}_∞

Durante o projeto de controladores \mathcal{H}_∞ filtros de ponderação (também chamados funções de ponderação) são utilizadas para impor pesos a certas regiões em frequência dos sinais de entrada e saída. Assim, informações relativas ao comportamento em frequência desses sinais são incorporadas ao projeto, reduzindo o conservadorismo. Desse modo, a solução do problema de otimização força os sinais de controle a se concentrarem nas faixas de frequência em que se deseja atenuar o efeito de entradas exógenas, melhorando-se o desempenho do sistema.

Os filtros de ponderação assumem particular importância no caso do controle de vibração em estruturas flexíveis, onde o modelo matemático é comumente obtido a partir de truncamento modal. A escolha apropriada de funções de ponderação garante que modos de vibração desprezados no modelo não sejam excitados quando o controle for implementado na planta real, evitando-se assim o fenômeno denominado *spillover*.

A correta seleção dos filtros requer um procedimento iterativo de ajuste. Em Zhou e outros (1996) são recomendadas funções de ponderação com as seguintes características:

- Filtros passa-baixas para a saída do sistema, de modo a priorizar a minimização do sinal de desempenho em baixas frequências. Uma possível função de transferência é:

$$W_p = \left(\frac{s + w_c / \sqrt[k]{M_p}}{\sqrt[k]{\epsilon_p} s + w_c} \right)^k. \quad (\text{C.1})$$

- Filtros passa-altas para a entrada do sistema (sinal de controle), de modo a priorizar a minimização do esforço de controle em altas frequências (evitando-se o *spillover*). Uma

possível função de transferência é:

$$W_u = \left(\frac{s/\sqrt[k]{M_u} + w_c}{s + w_c\sqrt[k]{\epsilon_u}} \right)^k. \quad (C.2)$$

Nas funções de transferência C.1 e C.2 os parâmetros M_p e M_u representam ganhos na região de passagem, ϵ_p e ϵ_u representam ganhos na região de rejeição, w_c é a frequência de corte e k é a ordem do filtro. A Figura C.1 identifica esses parâmetros na resposta em frequência de um filtro passa-baixas.

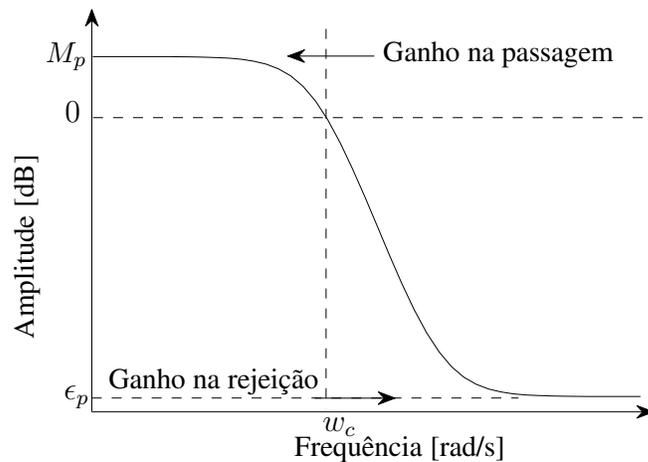


Figura C.1: Características da função de ponderação passa-baixas.

A escolha dos filtros de ponderação depende das particularidades de cada planta. Os parâmetros dos filtros devem ser determinados de acordo com a faixa de frequência em que se deseja a rejeição de distúrbios e também de acordo com a faixa de frequência em que se deseja que não exista esforço de controle. Essa ideia está exemplificada na Figura C.2.

É importante reforçar que os filtros de ponderação são uma ferramenta de projeto, incluídos apenas durante o projeto do controlador. Desse modo, o controlador é projetado para uma planta aumentada, conforme apresentado na Figura C.3.

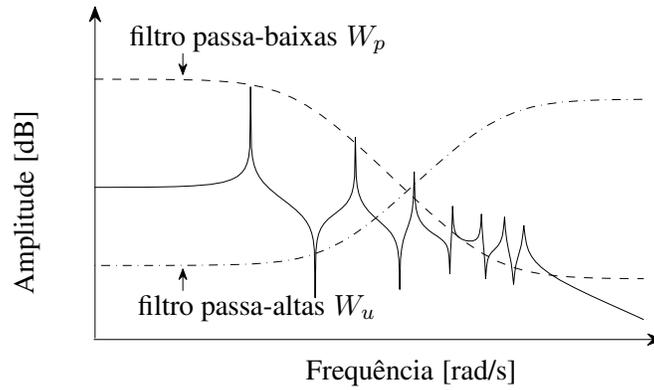


Figura C.2: Respostas em frequência de um sistema sem controle e de filtros de ponderação.

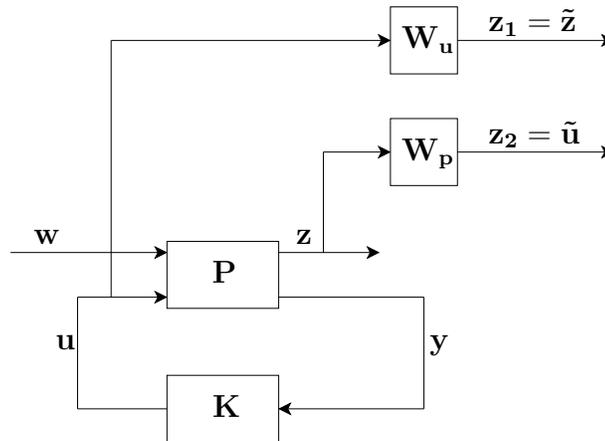


Figura C.3: Diagrama de blocos do sistema aumentado. W_u e W_p são filtros de ponderação, P é a planta e K é o controlador.

Este documento foi preparado com o formatador de textos $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ utilizando o modelo da FEM elaborado por (SILVA, 2012).