

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR MARCO ANTONIO DE
OLIVEIRA ALVES JUNIOR APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 25 / 05 / 2000

R. Pavanello
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Detecção de Falhas por Redes Neurais em uma Viga Flexível

Autor: Marco Antonio de Oliveira Alves Junior
Orientador: Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega
Co-orientador: Renato Pavanello

47/00

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

Detecção de Falhas por Redes Neurais em uma Viga Flexível

Autor: Marco Antonio de Oliveira Alves Junior
Orientador: Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega
Co-orientador: Renato Pavanello

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

2000 13485



UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	30
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	A187d
V.	Es.
TOMBO BC/	42258
PROC.	16-278100
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/09/00
N.º CPD	

CM-00145863-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

A187d

Alves Junior, Marco Antonio de Oliveira

Detecção de falha por redes neurais em uma viga flexível / Marco Antonio de Oliveira Alves Junior.-- Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Redes neurais. 2. Sistemas de controle ajustável..
3. Controladores auto-ajustáveis. I. Nóbrega, Eurípedes Guilherme de Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Dissertação de Mestrado

Detecção de Falhas por Redes Neurais em uma Viga Flexível

Autor: Marco Antonio de Oliveira Alves Junior

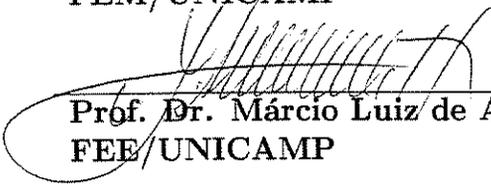
Orientador: Prof. Dr. Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega



Prof. Dr. Renato Pavanello, Presidente
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Márcio Luiz de Andrade Netto
FEE/UNICAMP

Campinas, 25 de Maio de 2000.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

"Digno de admiração é aquele que, tendo tropeçado ao dar o primeiro passo,
levanta-se e segue em frente"

(Carlos Fox)

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Dedico este trabalho à minha querida mãe, ao meu irmão, às minhas tias Zana e Rita, aos meus avós Teté e Zezinho, ao meus tios Jorge e Tieta, e à minha maior fonte de inspiração, minha doce namorada Tissi. Sem o apoio destas pessoas, este trabalho nunca teria sido realizado...

Agradecimentos

No final do ano de 1997 eu estava concluindo meu curso de graduação de Engenharia Mecânica na cidade de Salvador, minha querida terra natal. Como esperado recebi o título de Engenheiro Mecânico no início do ano de 1998. O que realmente eu nem imaginava era que não era um curso de engenharia que estava por findar e sim o início de uma nova vida. Este ano marcou o início da minha intenção em obter o título de mestre pela Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Aqui chegando fui acolhido pelo meu orientador Prof. Dr. Eurípedes Nóbrega, pessoa com a qual aprendi algumas coisas. Com ele passei a ver que a vida científica é feita de muita luta, sacrifício, humildade e principalmente perseverança. Por isso, é ao meu orientador que mando meus primeiros agradecimentos, uma vez que sua participação foi muito mais que orientar, com certeza o Prof. Dr. Eurípedes contribui não só na minha formação acadêmica mas na minha formação pessoal.

Em paralelo ao meu orientador, encontrei um forte apoio do Prof. Dr. Renato Pavanello, que com o passar do tempo veio a ser meu co-orientador, espero que ele não tenha arrependido-se da sua decisão, sinto-me muito honrado de ter sido ajudado por uma pessoa de tamanha competência. Gostaria de deixar meus agradecimentos ao Prof. Dr. Pablo Siqueira que apesar de não ter nenhuma ligação oficial, sempre ajudou-me com os seus conhecimentos. Por fim deixo minha gratidão ao Prof. Dr. Janito Ferreira pelas rápidas conversas e brincadeiras nos corredores.

Durante esta passagem pela UNICAMP, mais de dois anos, construí sólidas amizades, as quais deixou-me muito feliz. Pessoas como Khaled, Belisario, Adolfo, Pedro, Frederico, Lázaro, recebem o meu mais profundo agradecimento pelo prazeroso convívio. Além destas pessoas, gostaria de deixar um agradecimento especial ao meu amigo Dr. Allan Kardec Araújo, o qual faço questão de escrever o seu segundo sobrenome para que não paire nenhuma dúvida sobre sua existência física. Graças ao Dr. Allan, consegui ter bons momentos, as nossas conversas sérias, ou nem tanto, contribuíram à uma estadia mais agradável. Como não poderia deixar de ser, deixo também meus agradecimentos ao meu amigo Éder, pelas incontáveis ajudas com o Latex.

Ainda com relação aos meus amigos, deixo meus agradecimento aos meus amigos baianos. Daniel, Fábio, Antonio, Alex, e Ubatan, digo o muito obrigado pelo convívio e pela paciência.

Por mais incrível que pareça, gostaria de agradecer à minha querida sogra. Apesar dela ser uma sogra, e diga-se de passagem, uma boa sogra, a Profa. Glória Meyberg é uma das grandes mentes do mundo científico. A Profa. Glória sempre foi e sempre será um dos grandes parâmetros para definir o que é ser um pesquisador.

Acho que não poderia deixar de agradecer à pessoa mais importante da minha vida, minha querida namorada. Seu carinho, companheirismo, lealdade, deram-me o suporte necessário para enfrentar a difícil tarefa que é realizar uma dissertação de mestrado. Além disso, sua contribuição foi de grande valia para a dissertação, por ela, vim conhecer diversos editores para uso do Latex. Por isso e muito mais, gostaria de deixar registrado minha gratidão e principalmente meu respeito à menina mais doce que já conheci.

Por fim, gostaria de agradecer à FAPESP pelo suporte financeiro dado ao trabalho. O apoio dado por meio de bolsa e reserva técnica foram fundamentais para o desenvolvimento da dissertação.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Resumo	viii
Abstract	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Revisão Bibliográfica	2
1.1.1 Detecção de falha	2
1.1.2 Redes neurais	5
1.2 Proposta do Trabalho	6
1.3 Estrutura da Dissertação	7
2 MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLADORES	8
2.1 Método de Elementos Finitos	8
2.2 Modelagem de Trinca em Vigas	13
2.3 Modelagem da Variação de Massa em Vigas	17
2.4 Funções de Transferências da Viga	18
2.5 Controle Polinomial	20
2.5.1 Solução da equação do controlador	21
2.6 Controle Adaptativo	23
3 DETECÇÃO DE FALHAS	26
3.1 Detecção por Observadores	26
3.1.1 Observadores de Ordem Completa	27
3.1.2 Observadores de Saídas Robustos	28
3.2 Detecção por Redes Neurais	30
3.2.1 Redes neurais estáticas	33

3.2.2	Redes neurais dinâmicas	36
3.2.3	Escolha da rede neural para detecção de falha	38
4	RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS DA VIGA COM E SEM FALHA	40
4.1	Resultados Simulados	41
4.1.1	Simulação de Trinca com Controle Adaptativo	41
4.1.2	Simulação da Adição de Massa sem Controle	43
4.1.3	Simulação da Adição de Massa com Controle Polinomial	49
4.1.4	Simulação da Adição de Massa com Controle Adaptativo	56
4.2	Resultados Experimentais	57
4.2.1	Identificação	58
4.2.2	Medição da Viga sem Controle	61
4.2.3	Medição Da Viga Com Controle Polinomial	66
4.2.4	Medição da Viga com Controle Adaptativo	74
4.3	Análise dos Resultados	78
5	ANÁLISE DOS DETECTORES DE FALHAS UTILIZADOS	80
5.1	Detecção de Falhas Por Observador de Saída	80
5.1.1	Resultados Simulados	80
5.1.2	Resultados Experimentais	87
5.2	Detecção de Falhas por Redes Neurais	93
5.2.1	Resultados Simulados	93
5.2.2	Resultados Experimentais	101
5.3	Comparação dos Resultados Obtidos Via Observadores de Saída e Neural	106
5.3.1	Viga Sem Controle	107
5.3.2	Viga Com Controle Polinomial	108
5.3.3	Viga Com Controle Adaptativo	109
6	CONCLUSÕES	111
6.1	Conclusões Finais	111
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	114
6.3	Trabalhos Gerados como Parte da Dissertação	114
	Bibliografia	115
A	BANCADA EXPERIMENTAL	120
A.1	Descrição da Bancada Experimental	120
A.2	Sistema de Aquisição de Dados	122
B	LISTAGEM DE PROGRAMAS EM LINGUAGEM C	128

Lista de Figuras

2.1	Esquema da Viga Flexível	9
2.2	Viga Flexível Representada por Elementos Finitos	10
2.3	Representação de um elemento unidimensional	11
2.4	Representação de uma trinca em uma viga	14
2.5	Representação gráfica da matriz T de transformação	16
2.6	Representação discreta da viga flexível	17
2.7	Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada	21
2.8	Controle auto-sintonizado da planta	24
3.1	Diagrama de bloco do observador de ordem completa	27
3.2	Modelo não-linear de um neurônio	32
3.3	Perceptron de múltipla camada	34
3.4	Rede Neural RBF	35
3.5	Rede neural com dinâmica externa	36
3.6	Rede neural com dinâmica interna	37
3.7	Diagrama de blocos usado no treinamento neural	38
3.8	Arquitetura do treinamento neural	39
4.1	Durante a estimação de parâmetros para a viga flexível	42
4.2	Final da estimação de parâmetros para a viga flexível	42
4.3	Resposta da viga flexível submetida ao controle autosintonizado	42
4.4	Resposta da viga flexível com trinca submetida ao controle autosintonizado	42
4.5	Simulação da resposta da viga flexível, no domínio do tempo na faixa de 0 a 500Hz	43
4.6	Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio do tempo na faixa de 500Hz	44
4.7	Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio da frequência na faixa de 0-500Hz	45
4.8	Simulação da resposta da viga flexível, no domínio do tempo na faixa de 0-500Hz	47

4.9	Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz	47
4.10	Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio da frequência na faixa de 0-78Hz	48
4.11	Simulação da resposta saudável da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo	50
4.12	Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo	51
4.13	Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio da frequência	52
4.14	Simulação da resposta saudável da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo	53
4.15	Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo	54
4.16	Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio da frequência	55
4.17	Simulação da resposta da viga ao controle adaptativo no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz	56
4.18	Resposta da viga ao controle adaptativo e do modelo de referência	57
4.19	O sinal de Schroeder usado como entrada de perturbação	58
4.20	Identificação da viga flexível	59
4.21	Comparação entre FRFs teóricas e experimentais	60
4.22	Resposta livre da viga flexível no domínio do tempo na faixa de 0-500Hz	61
4.23	Resposta livre da viga flexível no domínio da frequência na faixa de 0-500Hz	63
4.24	Resposta livre da viga flexível no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz	64
4.25	Resposta livre da viga flexível no domínio da frequência na faixa de 0-78Hz	65
4.26	Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo	66
4.27	Comparação entre resposta com e sem controle polinomial na faixa de 0-500Hz, no domínio da frequência	67
4.28	Comparação entre resposta com e sem controle polinomial na faixa de 0-500Hz, no domínio da frequência	68
4.29	Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio da frequência	70
4.30	Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo	71
4.31	Comparação entre as respostas com e sem controle polinomial na faixa de 0-78Hz	72
4.32	Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio da frequência	73

4.33	Resposta da viga com controle adaptativo no domínio do tempo, sem adição de massa, na faixa de 0-78Hz	74
4.34	Resposta da viga com controle adaptativo no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz	75
4.35	Resposta da viga ao controle adaptativo no domínio da frequência na faixa de 0-78Hz	76
4.36	Comparação entre as respostas, controle polinomial e adaptativo . . .	77
5.1	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz	81
5.2	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz	82
5.3	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz	83
5.4	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz	84
5.5	Simulação da detecção de trinca na viga	85
5.6	Simulação da detecção da variação de massa na viga	86
5.7	Detecção experimental de falha, para viga sem controle, na faixa de 0-500Hz	88
5.8	Detecção experimental de falha, para viga sem controle, na faixa de 0-78Hz	89
5.9	Detecção experimental de falha, para viga com controle polinomial, na faixa de 0-500Hz	90
5.10	Detecção experimental de falha, para viga com controle polinomial, na faixa de 0-78Hz	91
5.11	Detecção experimental de falha, para viga com controle adaptativo, na faixa de 0-78Hz	92
5.12	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais	94
5.13	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz, usando redes neurais	95
5.14	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais	96
5.15	Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz, usando redes neurais	97
5.16	Simulação da detecção de trinca na resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais	98
5.17	Simulação da detecção de falha da resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais	99
5.18	Simulação da detecção de falha da resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais e nova escala	100
5.19	Detecção de falha da resposta da viga na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais	102
5.20	Detecção de falha da resposta da viga na faixa de 0-78Hz, usando redes neurais	103
5.21	Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz	104
5.22	Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz	105

5.23 Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle autosintonizado 106

A.1	Vista Frontal da Bancada Experimental	121
A.2	Vista da Viga Flexível	122
A.3	Programa para monitoramento dos sinais	123
A.4	Programa para atualização on-line dos parâmetros	125

Lista de Tabelas

2.1	Configuração usada para representar a viga via MEF	18
2.2	Cálculo das frequências naturais da viga flexível	19
4.1	Tabela comparativa entre as respostas livres e controladas	53
4.2	Comparação entre as frequências naturais da viga	61
4.3	Frequências Naturais da Viga Flexível Com e Sem Massa	64
4.4	Resultado do Controle polinomial	69
4.5	Tabela comparativa entre os controles polinomial e adaptativo	77

Resumo

Alves Junior, Marco Antonio de Oliveira. *Detecção de falhas por Redes Neurais em uma Viga Flexível*

. Campinas: Faculdade
de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000.
Dissertação de Mestrado.

O objetivo deste trabalho foi utilizar redes neurais para a detecção de falha, mostrando uma aplicação sem a utilização de modelos que pode ser estendida à plantas não-lineares. Para mostrar a aplicabilidade do método neural, foi feita uma comparação deste método com um observador que estima a resposta da planta. A comparação foi feita por meio de sinais simulados e medidos das respostas de uma viga com e sem falha estrutural. Os sinais caracterizaram-se por serem as respostas para os casos sem e com controle, onde o tipo de controle aplicado foi polinomial e adaptativo autosintonizado. As falhas foram representadas de duas formas: uma trinca e adição de massa, sendo estas causadoras de redução de frequência natural. O experimento foi realizado com uma viga flexível que possuía materiais piezoelétricos como sensores e atuadores. O estudo da representação matemática dos sistemas mecânicos, de suas trincas e da variação de massa, dos métodos de controle adotados e finalmente dos métodos de detecção de falhas, mostram como as redes neurais justificam-se neste âmbito de pesquisa.

Palavras chaves: Detecção de Falha, Observador Neural, Controle Polinomial, Controle Adaptativo Autosintonizado.

Abstract

Alves Junior, Marco Antonio de Oliveira. *Detecção de falhas por Redes Neurais em uma Viga Flexível*

. Campinas: Faculdade de

Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

(M.D.) Dissertation.

The main goal of this work is to present a neural network able to detect failures. As it was built like a state estimator, known as observer, was adopted the name of "neural observer". The advantage of this approach is that a mathematical model is not necessary and non-linear applications can be treated easier. To obtain results, the neural observer was compared to a robust observer, which is nowadays the most powerful tool for failure detection. The failures considered by the methods were cracks, mass variation simulation and measurement of mass variation on a beam. The experimental environment was a beam with actuators and sensors both made by piezoelectric ceramics, known as PZT.

Key words: Failure Detection, Neural Observer, Polynomial Control, Self-Turning Adaptive Control.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Detecção de falha tem se tornado uma das grandes exigências nos sistemas mecânicos. A necessidade de uma rápida identificação das falhas que ocorrem no sistemas vem aumentando dia-a-dia, uma vez que o conhecimento das falhas existentes possibilita uma tomada de decisão no mais curto tempo possível, ganhando-se em produtividade e redução de custos de manutenção. Esta rápida decisão só pode ser feita com um correto diagnóstico da falha e este só pode existir com uma correta detecção de falha.

Baseado nesta idéia e considerando a grande evolução das estruturas mecânicas ativas, estudaram-se algumas variações que poderiam ocorrer em uma viga flexível, estando ou não submetidas a um sistema de controle de vibração. O objetivo principal do trabalho é o estudo do uso de redes neurais para a detecção de falhas. Foi adotado que as falhas que ocorreriam na viga seriam o aparecimento de uma trinca e uma variação de massa, sendo que ambas causam uma redução nas frequências naturais da estrutura.

Com esta planta, implementou-se um método baseado em observadores de saída para detecção de falha e comparativamente usou-se uma rede neural dinâmica para execução da mesma tarefa. Esta rede neural foi aqui chamada de *observador neural*, uma vez que é realizada uma estimação da resposta da viga flexível.

Sendo assim, foram implementados um observador de saída e um neural para detecção das falhas existentes na viga flexível.

1.1 Revisão Bibliográfica

Para melhor compreensão do trabalho aqui apresentado será feita uma breve revisão bibliográfica com relação aos métodos de detecção de falha, com ênfase no uso de observadores, e sobre redes neurais de modo geral.

1.1.1 Detecção de falha

Os sistemas físicos sempre lidam com a possibilidade da ocorrência de fenômenos inesperados, tais como variações nas condições operacionais e falhas de componentes. Estas variações podem causar uma perda no desempenho operacional de toda planta e por causa desta situação convencionou-se chamar tais transformações de "Falhas" [1]. Para manter então um alto desempenho dos sistemas, é importante que estas falhas sejam detectadas e identificadas o quanto antes. Diante desta necessidade vários trabalhos foram feitos a partir da década de 70. Alguns dos métodos usados neste período foram: detecção e identificação de falhas (FDI) em sistemas dinâmicos [2], detecção de falhas por filtragem [3], generalização da razão de verossimilhança (GLR) [4], e métodos de múltiplos modelos [5].

Como dito acima, várias abordagens puderam ser dadas às detecções de falhas, cada uma com sua devida contribuição. Todavia, importantes trabalhos começaram a serem publicados com relação à abordagem de detecção e isolamento de falhas, *FDI*, no início da década de 80, que consistem basicamente no conceito de geração de resíduo e tomada de decisão. Em Edward [1] foi feito um trabalho onde a geração de resíduo e a subsequente tomada de decisão era baseada em uma abordagem conhecida por *relação de paridade*, sendo que nesta relação iniciava-se uma maneira de aumentar a confiabilidade de detecção e decisão. Começava-se a aplicar robustez na geração de resíduo, isto porque as aplicações existentes até então usavam dados determinísticos, causando significativas diferenças no momento da aplicação do método em situação real. Desta maneira as formulações existentes passaram a lidar com dados experimentais, ou seja, sinais poluídos por ruídos.

Sendo assim como a maioria dos métodos existentes necessitava de um mod-

elo matemático, e neste a abordagem usada era de uma modelagem linear, os resultados dos modelos com os dados reais teriam uma diferença. Esta diferença poderia não informar o que de fato estava acontecendo com o sistema. O trabalho de Xi-Cheng [6] relata a detecção de falha através de relações robustas, levando-se em conta as incertezas da planta. A idéia de Xi-Cheng era a de que um sistema tivesse uma enorme sensibilidade às falhas que pudessem ocorrer mas uma mínima sensibilidade aos erros de modelagem.

Como dito, o método empregado gerava um resíduo, e baseado neste resíduo tomava-se uma decisão. Matematicamente falando, esta decisão é baseada em uma comparação entre um resíduo e um limiar, que é um patamar de limite. Caso um resíduo ultrapassasse certo valor, estaria iniciado uma situação de alarme. Porém, este limiar era um valor constante o que abria margem a falsos alarmes ou não alarme. Em adição às abordagens de robustez empregadas na geração de resíduo, realizou-se no final da década de 80 trabalhos na seleção de limiares. Pode-se ver em [7] um trabalho para a escolha do tipo de limiar usado na detecção de falha, onde sua inovação foi com relação às descrições das incertezas do modelo no domínio da frequência para escolha do limiar.

No início da década de 90 Paul Frank, fez uma revisão dos métodos de detecção de falha [8]. Este trabalho examinou os métodos existentes, tais como métodos de estimação de estado e identificação de parâmetros para uso de modelos na geração de resíduo. Além disso, foi apresentado como relacionar os conhecimentos analíticos com os heurísticos de modo a formar uma base de conhecimento para gerar diagnósticos. Assim, além do aprimoramento das técnicas de detecção de falha, começava-se a realizar o diagnóstico das falhas.

Ainda em 1990 foi realizado um importante trabalho por Ding e Frank, [9]. Eles provaram, através de uma abordagem de fatorização, que a resposta da planta pode ser estimada usando técnicas de robustez. Foi apresentado que a resposta da planta pode ser modelada através de uma fatorização da matriz do sistema em função de matrizes pertencentes ao RH_∞ , ou seja, matrizes realizáveis em um plano linear estável, sendo a estas adicionadas às matrizes de distribuição do vetor de falhas e de perturbações. Eles provaram que a estimação da saída seria possível, caso o sinal de

entrada e o sinal de saída da planta fossem ponderadas por matrizes que resultavam em um observador de saída. Assim, o resultado é que a estimação gerava um resíduo que possui a seguinte condição:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{y}(t) - y(t)) = 0, \quad (1.1)$$

onde $\hat{y}(t)$ a estimação da saída, $y(t)$ a saída da planta. Nota-se que quando o tempo da estimação tende a infinito o resíduo é igual a zero. Esta característica é obtida mediante a estimação da saída que é dada na equação 1.2.

$$\hat{y}(s) = F(s)u(s) + G(s)y(s), \quad (1.2)$$

onde s é a variável de Laplace, $F(s)$ e $G(s)$ são as matrizes pertencentes ao RH_{∞} , e $u(s)$ o sinal de entrada da planta. Assim para realização de detecção de falha, foi usada a seguinte relação matemática.

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad & \hat{y}(s) - y(s) = 0 \quad \text{se} \quad d(s) = 0, \\ \text{(ii)} \quad & \hat{y}(s) - y(s) \neq 0 \quad \text{se} \quad d(s) \neq 0, \end{aligned}$$

onde $d(s)$ é um vetor de falha.

A partir desta publicação, os trabalhos apresentaram uma tendência a serem feitos com as técnicas robustas até então desenvolvidas. Frank [10] publicou um trabalho com relação à detecção e isolamento de falha (FDI) onde foi feita uma revisão dos métodos básicos usados na detecção de falha, identificação de parâmetros, abordagem de paridade de estado e estratégia da base de conhecimento. Como adição aos métodos, Frank aplicou a teoria para detecção de falhas onde os sinais de perturbação da planta eram desconhecidos, sendo o método chamado de *observador de entradas desconhecidas*.

Seguindo esta linha de pesquisa Frank [11] mostra uma abordagem no domínio da frequência que reafirmou os resultados previamente encontrados, mas sendo dada atenção à geração de resíduo robusto. Desta forma, não foi levado em conta como calcular a incerteza da planta ou qual o melhor tipo de limiar a ser comparado ao resíduo robusto.

Assim, Frank [12] publicou um trabalho fazendo uma revisão dos métodos de detecção de falha com abordagem de robustez. Os métodos revistos foram os

seguintes: geração de resíduo, modelagem da planta, modelagem das incertezas da planta e escolha do limiar. Neste trabalho é introduzida a abordagem de limiar adaptativo. Ao contrário dos trabalhos passados, onde os métodos tentavam achar um patamar para realizar detecções corretas, agora trabalha-se com o conceito de que o limiar varia com o resíduo, visando acompanhar somente as perturbações normais do sistema, como por exemplo, nível de ruído, vibrações normais da planta, etc.

1.1.2 Redes neurais

A rede neural é um modelo matemático que tem analogia com funcionamento de um neurônio biológico. Sabe-se que um neurônio biológico só foi identificado anatômicamente no século 19, pelo neurologista espanhol Ramón y Cajal, [13]. Entretanto uma representação matemática de uma rede neural só foi realizada em 1943 pelo neurofisiologista Warren McCulloch e pelo lógico Walter Pitts, [14]. Como tratava-se de um modelo inicial diversos trabalhos foram feitos para o seu aperfeiçoamento. Hebb [15] fez contribuições importantes sobre os métodos de aprendizagem, Rosenblatt [16] propôs uma generalização conhecida por "Perceptron", cujo resultado foi a prova do método de aprendizado do modelo de McCulloch & Pitts. Todavia outros autores, Minsky & Papert [17] mostraram que um perceptron possuía limitações.

No entanto somente na década de 80 as redes neurais puderam ser usadas em situações mais realísticas. Hopfield [18] estabeleceu um modelo de rede neural dinâmica, além de ter sido estabelecido um novo algoritmo de treinamento para um perceptron de múltiplas camadas [19]. Nesta época as redes neurais eram destinadas aos trabalhos de reconhecimento de padrões e otimização.

Por causa destes fatos a década de 90 começou com trabalhos realizando diversas aplicações com redes neurais. Narendra [20] mostra que uma rede neural dinâmica pode ser usada com sucesso para identificação e controle de sistemas dinâmicos. Através do uso de perceptron de múltiplas camadas, realiza-se uma identificação do sistema, fazendo para tanto uma comparação entre redes estáticas e redes dinâmicas. Com o treinamento realizado e usando-se uma rede neural dinâmica, Narendra mostrou por simulação que redes neurais podem ser usadas em controle

adaptativo. Como extensão desta linha de trabalho, Asriel & Narendra [21] publicaram um trabalho tratando o controle de sistemas não-lineares usando abordagem de controlabilidade e estabilização. Eles mostraram, também por simulação, que desde que os estados fossem possíveis de serem medidos, o controle em sistemas dinâmicos não-lineares era possível. Em [22] estes autores mostraram, novamente por simulações, como realizar uma identificação e um controle onde os estados não estivessem disponíveis.

A aplicabilidade das redes neurais tornou-se de grande valia ao mundo acadêmico, porém a maioria dos trabalhos eram teóricos com confirmações feitas por meio de simulações. Yang [23] realizou um controle baseado em redes neurais mas em um ambiente experimental. A planta era uma viga flexível a qual era excitada e controlada por materiais piezoelétricos, chamados de PZT. As conclusões mostraram que tanto na fase de identificação quanto na realização do controle, a rede neural comportou-se como esperado. Em Khater, [24], foi desenvolvido um trabalho experimental para realização de controle baseado em redes neurais. Neste trabalho, algumas redes neurais foram usadas para controlar vibrações torcionais em um eixo flexível.

Paralelamente às aplicações mencionadas, as redes neurais também começaram a ser usadas nas detecções e diagnósticos de falha. Kajiro [25] realizou um trabalho onde as falhas eram detectadas e diagnosticadas através do uso de várias redes neurais. A idéia do trabalho era treinar várias redes neurais com padrões de estado saudável e falho de modo a rede separar futuras falhas que pudessem ocorrer no sistema. Seguindo-se a este trabalho, Vemuri & Polycarpou [26] aplicaram o método de redes neurais no diagnóstico de falhas em um braço de robô. Aqui foi usada uma abordagem de incertezas do sistema de modo aumentar a robustez das informações dadas as redes neurais.

1.2 Proposta do Trabalho

A detecção de falhas quando realizada por geração de resíduo com base em técnicas robustas produz resultados bastantes confiáveis, principalmente porque Ding

provou que este resíduo pode ser gerado pela comparação entre a saída da planta e a estimação desta saída, ou seja, um resíduo formado pelo erro das saídas.

Diante disto desenvolveu-se um observador baseado em redes neurais de modo a realizar a mesma geração de resíduo, mas com possíveis aplicações em sistemas não-lineares e não necessitando para tanto o uso de modelos matemáticos, uma vez que a rede neural pode ser treinada a partir de sinais experimentais e delas estimada a saída da planta.

A proposta do presente trabalho, é implementar um observador neural que realize uma detecção de falha comparável aos observadores de saída. Para validar o método desenvolvido foram usadas simulações de trinca e de variação de massa em uma viga flexível e o método foi também aplicado experimentalmente para a variação de massa.

1.3 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo a dissertação está estruturada da seguinte forma: o capítulo 2, Modelagem Matemática e Controladores, trata da modelagem matemática, onde engloba-se o método de elementos finitos, modelagem da trinca, modelagem da variação de massa na viga flexível, e um resumo da teoria dos controladores usados, polinomial e adaptativo autosintonizado. O capítulo três, Detecção De Falhas, trata da teoria de observadores, onde explicam-se os observadores determinísticos e o observador de saída baseado em técnicas de fatorização. O capítulo 4, Resultados Simulados E Experimentais, é sobre os resultados encontrados, identificação, simulação e resultados experimentais. O capítulo 5, Análise Dos Detectores De Falhas Utilizados, faz uma comparação entre a detecção de falha realizada pelo observador de saída e pelo observador neural. Por fim o capítulo 6, Conclusões, trata das conclusões fazendo-se antes uma análise dos resultados.

Capítulo 2

MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLADORES

Este capítulo mostra a modelagem da viga flexível e o projeto dos controles polinomial e adaptativo autosintonizado. Além disso, é feita uma pequena introdução ao método de elementos finitos uma vez que para a resolução do problema da viga com trincas e variação de massa, tal método é adotado. A trinca e a variação de massa representam as falhas estudadas na viga flexível.

2.1 Método de Elementos Finitos

De uma maneira geral o Método de Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo resolver os problemas de mecânica que podem ser representados por um sistema de equações diferenciais que não possuem soluções na forma analítica [27]. Esta resolução é baseada em aproximações do tipo polinomial nodal em subdomínios, implicando assim em um processo de discretização dos domínios. Por causa disto os sistemas mecânicos podem ter formas geométricas irregulares arbitrárias. Em virtude das diversas possibilidades de aplicação, o MEF tornou-se uma grande ferramenta computacional para o estudo de estruturas mecânicas e junto ao aumento da capacidade de processamento de dados, surgiu um grande número de programas de elementos finitos. ANSYS, ASKA e NASTRAN podem ser citados como os primeiros

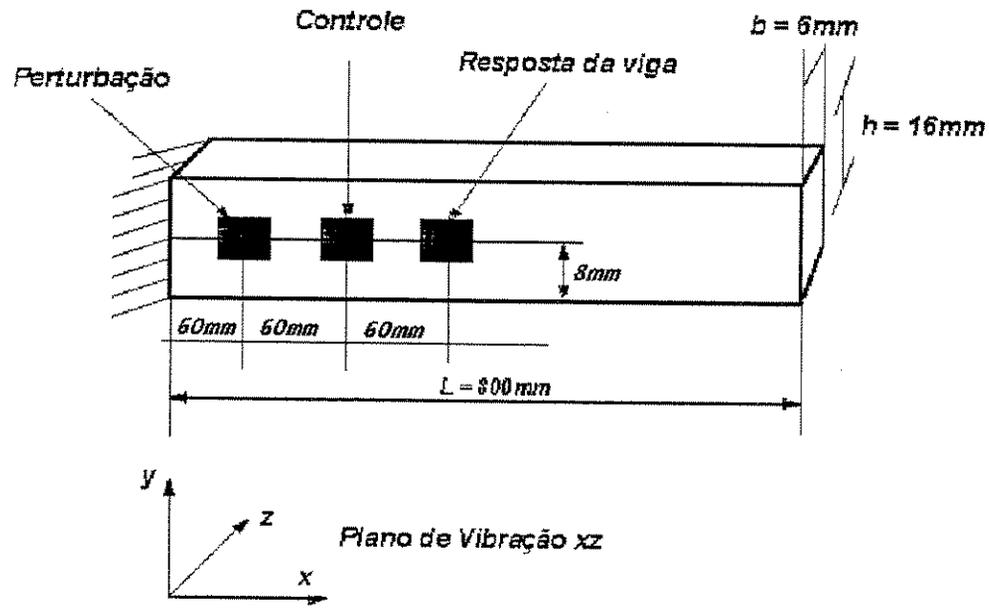


Figura 2.1: Esquema da Viga Flexível

programas comerciais destinados ao uso do MEF.

O uso do método de elementos finitos implica em buscar-se soluções locais, cujas propriedades garantam uma solução global. A aplicação do MEF será para uma viga flexível que é vista na figura 2.1. Esta figura apresenta a configuração usada na bancada experimental e nas simulações.

Na figura 2.1 nota-se que a viga possui um comprimento de 800 mm , onde a perturbação é posicionada a 60 mm do engaste, o sinal de controle colocado a 120 mm do engaste e a resposta do sistema medida a 180 mm do engaste.

Para aplicação do MEF, a viga representada na figura 2.1 é discretizada e pode ser vista na figura 2.2.

Nesta figura nota-se que a viga foi representada por um elemento clássico de viga unidimensional com dois nós por elemento, onde cada nó possui dois graus de liberdade, deslocamento e rotação. O número de elementos foi variado de acordo com a simulação efetuada, mas o número mínimo usado foi de quatro elementos.

Para modelar a viga pelo MEF, o primeiro passo foi a obtenção de uma

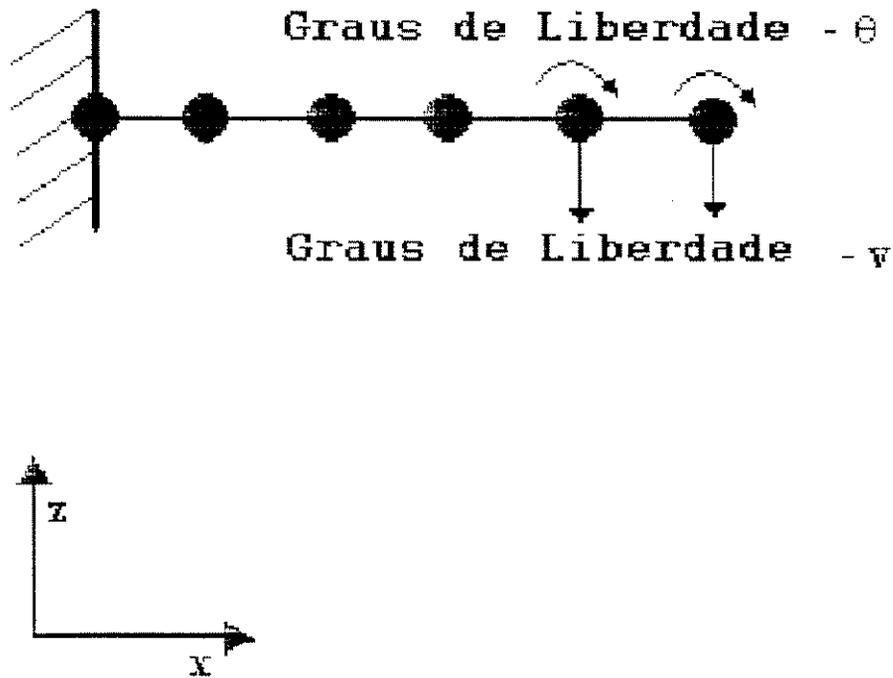


Figura 2.2: Viga Flexível Representada por Elementos Finitos

equação diferencial que represente o seu comportamento dinâmico. Mediante este equacionamento, usou-se uma formulação fraca e, por conseguinte, determinou-se as matrizes necessárias a solução aproximada do problema.

Admitindo uma viga submetida a um carregamento dinâmico e sujeita a pequenos deslocamentos, a equação diferencial usada para representar a viga é dada na equação 2.1.

$$EI \frac{d^4 V}{dx^4} + \rho A \ddot{V} - p(x) = 0, \quad (2.1)$$

sendo V o deslocamento transversal, $p(x)$ o peso por unidade de comprimento da viga, E o coeficiente de elasticidade, I o momento de inércia, ρ a densidade volumétrica, e A a área da seção transversal. Esta equação é conhecida como a equação de Bernoulli-Euler. Para resolver esta equação usou-se o método dos resíduos ponderados, passando-se o problema para sua forma fraca. Desta forma a equação

2.1, na sua forma integral torna-se,

$$\int_0^l \left(EI \frac{d^4 V}{dx^4} + \rho A \ddot{V} - p(x) \right) W d\bar{x} = 0. \quad (2.2)$$

Sendo W o conjunto de funções de ponderação, e l o comprimento de um elemento da viga que pode ser visualizada na figura 2.3.

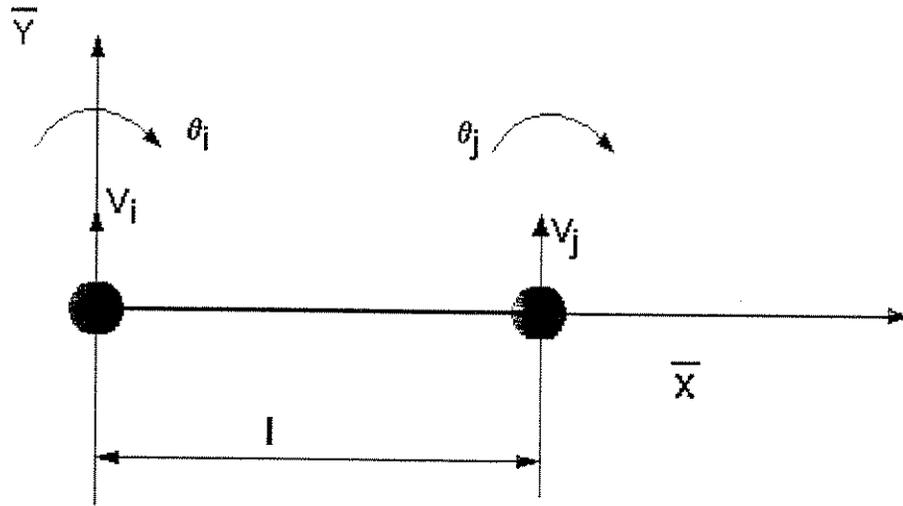


Figura 2.3: Representação de um elemento unidimensional

Considerando a estrutura discretizada em n elementos, e adotando-se o método de Galerkin $W = N$, sendo N as funções de forma, o resíduo ponderado 2.2 após duas integrações por partes, torna-se:

$$\int_0^l (\rho A) N dX \frac{d^2 V}{dt^2} - \int_0^l N p(x) d\bar{x} + \int_0^l EI \left(\frac{d^2 N}{d\bar{x}^2} \frac{d^2 V}{d\bar{x}^2} \right) d\bar{x} = 0. \quad (2.3)$$

Nota-se que a equação era de quarta ordem, mas com a formulação usada foi reduzida para uma integração de segunda ordem. A formulação apresentada em 2.3 é a forma fraca do problema.

Para a variável deslocamento transversal V , usa-se a seguinte aproximação:

$$V \simeq \tilde{V} = \sum_{k=1}^K v_k N_k. \quad (2.4)$$

Assim, quando $K \rightarrow \infty$ a função \tilde{V} tenderá à função real V . Na prática realiza-se um truncamento, possibilitando o somatório acima ser escrito na seguinte forma matricial:

$$\tilde{V} = [N]^T \{V\}. \quad (2.5)$$

Onde $[N]$ é a matriz que contém as funções de forma do problema e $\{V\}$ é o vetor das variáveis nodais.

Para o caso clássico da viga de Bernoulli-Euler, as funções de forma são dadas por:

$$N_1 = 1 - 3\frac{\bar{x}^2}{l^2} + 2\frac{\bar{x}^3}{l^3}, \quad (2.6)$$

$$N_2 = \bar{x} - 2\frac{\bar{x}^2}{l} + \frac{\bar{x}^3}{l^3}, \quad (2.7)$$

$$N_3 = 3\frac{\bar{x}^2}{l^2} - 2\frac{\bar{x}^3}{l^3}, \quad (2.8)$$

$$N_4 = -\frac{\bar{x}^2}{l} + \frac{\bar{x}^3}{l^2}, \quad (2.9)$$

e as variáveis nodais são definidas por:

$$\{V\} = \begin{Bmatrix} \tilde{v}_i \\ \tilde{\gamma}_i \\ \tilde{v}_j \\ \tilde{\gamma}_j \end{Bmatrix}. \quad (2.10)$$

Com as funções de forma determinadas, basta apenas substituí-las na formulação fraca nas equações 2.3 e 2.4 de cada elemento.

Substituindo as funções de forma e resolvendo a integral para cada termo da matriz de rigidez, tem-se:

$$K^e = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

O procedimento para obtenção da matriz de massa são os mesmos apresentados anteriormente. Sendo assim, a matriz de massa é dada por:

$$M^e = \frac{ml}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22 & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Estas matrizes estão relacionadas aos graus de liberdade de deslocamento e rotação de cada um dos nós. Na viga em que se trabalhou, executou-se apenas uma análise no plano, uma vez que os deslocamentos axiais estão todos restritos. Usando-se o método dos deslocamentos, pode-se obter as matrizes globais de massa e rigidez da viga flexível e realizar uma análise estática ou dinâmica de acordo com a aplicação desejada.

2.2 Modelagem de Trinca em Vigas

Diversos métodos matemáticos se aplicam ao entendimento das causas e conseqüências de uma trinca sobre o comportamento mecânico de um sistema. Esforços na modelagem da trinca foram feitos com o objetivo de se atingir uma representação mais precisa da realidade. Os métodos mais conhecidos para modelagem de trincas são métodos baseados nos deslocamentos, na Integral J e na avaliação da Energia de Deformação. Um estudo mais aprofundado da modelagem de trincas está além do escopo deste trabalho. Foi realizado apenas um estudo introdutório sobre o método de modelagem baseado na energia de deformação. Sua formulação é razoavelmente simples, e as equações que representam trincas em estruturas simples são facilmente encontradas em artigos técnicos e “handbooks”. Além disso, estas equações são aplicadas ao Método de Elementos Finitos, conduzindo a uma formulação que permite obter as matrizes de rigidez, massa e amortecimento da estrutura. Estas matrizes serão muito usadas na formulação de modelos para detecção de trinca e nos métodos de controle. A descrição do método será apresentada a seguir.

Nesta seção, para que seja possível a obtenção da matriz do elemento com

trinca, será aplicado o conceito de energia de deformação. Por definição, é assumido que uma trinca tem largura e massa desprezível, onde esta definição pode ser vista na figura 2.4.

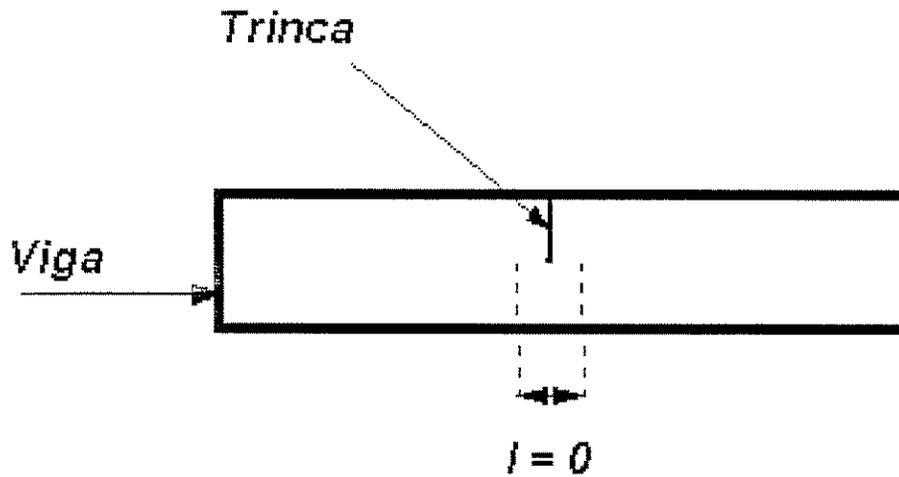


Figura 2.4: Representação de uma trinca em uma viga

Além disso, os modos de carregamento de trincas podem se dar de três formas. Modo de abertura K_I , modo cisalhante K_{II} e modo de rasgamento K_{III} . Mais adiante será mostrado quais modos foram considerados na viga flexível.

Com base em tais conceitos, pode-se notar que as energias de deformação para um elemento com trinca e sem trinca serão diferentes. Desta maneira, elementos de viga com trincas terão flexibilidades diferentes à de uma viga sem nenhum defeito estrutural. Conclui-se que a inclusão deste defeito no modelo implicará em uma viga de maior grau de flexibilidade.

Para obtenção de um elemento com trinca, a energia total de deformação é a soma da energia de deformação do elemento perfeito com a energia de deformação da própria trinca. Como dito acima, uma trinca não possui comprimento nem massa, e quando soma-se a energia de deformação, causada por uma trinca, com a energia de deformação de elemento sem falha, o que se está fazendo é aumentando a flexibilidade total do elemento.

A energia de deformação de um elemento n sem trinca é [28],

$$W^{(0)} = \frac{(M^2L + MPL^2 + \frac{P^2L^3}{3})}{2EI} \quad (2.13)$$

A energia de deformação devido à trinca é,

$$W^{(1)} = b \int_0^a \left[\frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E'} + \left(\frac{(1+v)K_{III}^2}{E} \right) \right] da. \quad (2.14)$$

Onde M é um momento fletor, P um carregamento transversal pontual, ν o módulo de Poisson, K_I , K_{II} e K_{III} fatores de intensidade de tensão, a é a profundidade da trinca, b é a base da seção transversal da viga, E o módulo linear de elasticidade usado para tensões planas, e E' uma constante que obedece à relação $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ e é usada para deformações planas. Admitindo-se que a trinca não é ocasionada por forças axiais, e lembrando que $K_I = K_{IP} + K_{IM}$, a equação acima torna-se,

$$W^{(1)} = b \int_0^a \frac{(K_{IM} + K_{IP})^2 + K_{IIP}^2}{E'} da, \quad (2.15)$$

Os termos da equação 2.15 são dados abaixo.

$$K_{IM} = \left(\frac{6M}{bh^2} \right) \sqrt{\pi a} F_I(s), \quad (2.16)$$

$$K_{IP} = \left(\frac{3PL}{bh^2} \right) \sqrt{\pi a} F_I(s), \quad (2.17)$$

$$K_{IIP} = \left(\frac{P}{bh} \right) \sqrt{\pi a} F_{II}(s), \quad (2.18)$$

$$F_I(s) = \sqrt{\frac{2}{\pi s} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi s}{2} \right) \frac{0.923 + 0.199[1 - \sin(0.5\pi s)]^4}{\cos(0.5\pi s)}}, \quad (2.19)$$

$$F_{II}(s) = (3s - 2s^2) \frac{1.122 - 0.561s + 0.085s^2 + 0.18s^3}{\sqrt{1-s}}, \quad (2.20)$$

$$s = \frac{a}{h}. \quad (2.21)$$

Sendo assim, as energias de deformação estão definidas. Por definição, os termos da matriz de flexibilidade são dados por,

$$c_{ij}^k = \frac{\partial^2 W^k}{\partial P_i \partial P_j}, \quad (2.22)$$

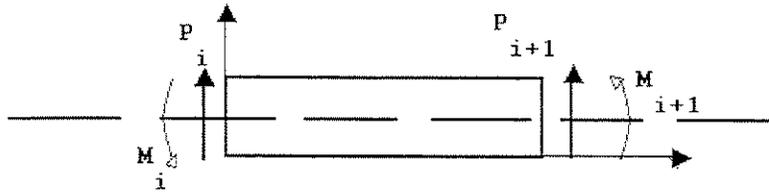


Figura 2.5: Representação gráfica da matriz T de transformação

sendo $i, j = 1, 2; P_1 = P, P_2 = M; k = 0, 1$. Desta forma, os termos da matriz de flexibilidade da trinca e do elemento normal estão definidos.

Assim, a matriz que representará o elemento com trinca será formada pelos termos

$$c_{ij} = c_{ij}^{(0)} + c_{ij}^{(1)}, \quad (2.23)$$

onde a matriz de rigidez para o elemento com trinca é

$$K_t = [T]^T [c]^{-1} [T] \quad (2.24)$$

sendo T uma matriz de transformação. A matriz T é dada na seguinte forma:

$$T = \begin{bmatrix} -1 & -L & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \quad (2.25)$$

A função da matriz T é relacionar o elemento com trinca ao elemento clássico unidimensional da viga. Maiores detalhes da modelagem de vigas sujeitas a trincas podem ser encontradas em [28].

2.3 Modelagem da Variação de Massa em Vigas

A variação de massa na viga flexível foi feita usando a matriz global de massa. Através de uma análise do local de ocorrência da variação da massa, adicionou-se a mesma no respectivo grau de liberdade que pode ser localizado na matriz global de massa.

A primeira tarefa realizada foi escolher onde iria ocorrer um acréscimo de massa. Três posições foram escolhidas, onde estas posições deveriam estar de acordo com o experimento a ser realizado. Assim a primeira situação foi uma massa colocada a 25cm do engaste, onde o efeito desta massa nesta posição foi denominado como "falha 1", a segunda posição para adição da massa foi a 45cm do engaste, sendo seu efeito denominado "falha 2", e por fim a terceira posição para adição da massa, foi a 75cm da extremidade engastada, esta foi denominada "falha 3".

A peça que foi adicionada à planta possui massa de $0,4\text{Kg}$. Seu peso foi determinado através de medidas em laboratório, uma vez que esta massa foi usada na bancada experimental.

Como dito anteriormente vários refinamentos da malha foram usados para a modelagem da viga. Mas dentre as configurações usadas uma foi escolhida como a mais adequada para fins de controle e detecção de falha, nos exemplos estudados. A representação da viga discreta é mostrada na figura 2.6.

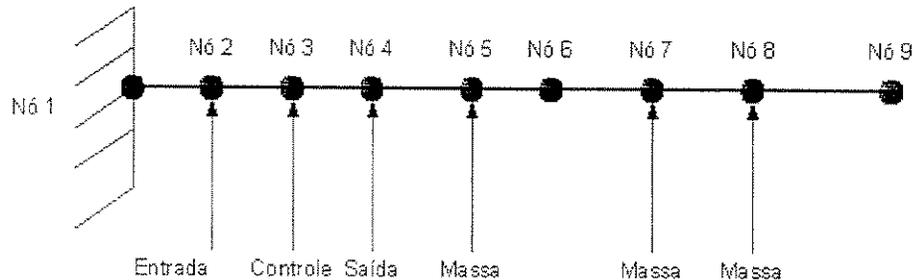


Figura 2.6: Representação discreta da viga flexível

As posições dos nós 2, 3 e 4, coincidiram com o sinal de perturbação, sinal de controle, e medida da resposta da viga, respectivamente. A massa da posição 1 foi colocada no nó 5, e assim para posição 2 no nó 7 e para a posição 3 no nó 8.

Na tabela 2.2 estão registrados os dados usados para representação da viga flexível.

Tabela 2.1: Configuração usada para representar a viga via MEF

Elemento	1	2	3	4	5	6	7	8
Tamanho (cm)	6	6	6	7	10	10	30	5

Nesta tabela vê-se que os elementos possuem comprimentos diferentes, sendo esta configuração a base para os trabalhos experimentais, os quais serão explicados mais adiante.

2.4 Funções de Transferências da Viga

Com as matrizes globais de massa e rigidez calculadas pode-se passar o modelo para a forma de estado chegando-se a um modelo representado por uma função de transferência. Para este caso escolheu-se trabalhar com modelos representados por funções de transferências, uma vez que achou-se que uma comparação com funções de transferências experimentais seria mais imediata.

Através do MEF foram calculadas as matrizes de massa e rigidez da viga e com estas as frequências naturais foram obtidas. A tabela 2.3 mostra as 10 primeiras frequências naturais calculadas pelo método de elementos finitos, considerando-se a viga sem defeito.

Na seqüência deseja-se uma função de transferência que relacione força, como entrada do modelo e deformação longitudinal, como saída do modelo.

Sabe-se que a viga será submetida a um sinal periódico e como trata-se de um sistema linear, as respostas também serão periódicas, ocorrendo apenas mudanças de fase e amplitude. Dessa maneira pode-se afirmar que o sistema terá uma resposta forçada e como será calculado um amortecimento para a estrutura, pode-se ainda dizer que a viga possuirá uma resposta amortecida. Este comportamento é representado pela seguinte equação diferencial:

$$Kx + C\dot{x} + M\ddot{x} = fe^{i\omega t}, \quad (2.26)$$

Tabela 2.2: Cálculo das frequências naturais da viga flexível

<i>Frequências Naturais da Viga Flexível</i>	
f_1	7.71Hz
f_2	48.32Hz
f_3	135.35Hz
f_4	265.41Hz
f_5	439.43Hz
f_6	660.28Hz
f_7	928.24Hz
f_8	1229.90Hz
f_9	1738.80Hz
f_{10}	2200.30Hz

onde K é a matriz global de rigidez, M a matriz global de massa, C matriz global de amortecimento, f é a força de excitação, e $x = Ve^{i\omega t}$ representa a resposta do sistema. Ainda Z é a amplitude máxima do movimento, i é igual a $\sqrt{-1}$, t o tempo e ω a frequência de excitação do sistema.

Derivando duas vezes a resposta, e substituindo-se na equação 2.26 a equação do movimento torna-se,

$$(K - \omega^2 M + i\omega C)V = f, \quad (2.27)$$

onde percebe-se uma relação entre deslocamento e força da viga flexível. Entretanto esta formulação ainda sofreu certos tratamento matemáticos.

Fazendo-se uma expansão modal, a qual é explicada com detalhe em Géradin [29], a amplitude mostrada nas equações acima pode ser representada pela seguinte equação:

$$V = \sum_{s=1}^n \alpha_s X_s, \quad (2.28)$$

onde s é um índice dos modos de vibração, X_s são os autovetores do sistema e α um coeficiente a ser determinado.

Após algumas manipulações matemáticas mostra-se a seguinte equivalência:

$$(K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\omega_{0s}^2 - \omega^2 + 2i\varepsilon_s \omega \omega_{0s}} \frac{X_s X_s^T}{\mu_s}. \quad (2.29)$$

Isto quer dizer que a função de transferência que relaciona deslocamento e força é dado pela seguinte equação,

$$\frac{V}{f} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\omega_{0s}^2 - \omega^2 + 2i\varepsilon_s \omega \omega_{0s}} \frac{X_s X_s^T}{\mu_s}, \quad (2.30)$$

onde ω é a frequência de excitação, ω_{0s} a frequência natural de cada modo, μ_s é a massa generalizada que é calculada por $X_s^T M X_s$, e ε_s o amortecimento modal. No caso de um amortecimento proporcional o amortecimento modal pode ser calculado por $\varepsilon_s = \frac{1}{2} \left(\alpha \omega_{0s} + \frac{\beta}{\omega_{0s}} \right)$, onde α e β são constantes a serem definidas. Para a aplicação do modelo foi usado um amortecimento calculado com base no método de "Peak-Peaking", onde uma completa explanação pode ser achada em Ewins [30].

2.5 Controle Polinomial

Um projeto de controle feito com técnicas polinomiais possibilita uma melhor investigação das conseqüências dos erros de modelagem no projeto do controlador. A abordagem de colocação de pólos (pole-placement) é usada no controle polinomial, que consiste em obter-se três polinômios que forneçam os pólos e zeros desejados. Para formulação de malha fechada será mostrada uma maneira geral para obter-se tais polinômios.

É assumido que o sistema possui uma variável de controle, u , e uma medida para resposta da planta, y , as quais estão relacionadas pelo seguinte modelo SISO (Entrada e saída únicas).

$$A(q)y(k) = B(q)u(k), \quad (2.31)$$

onde q é o operador avanço unitário, $B(q)$ e $A(q)$ são polinômios coprimos, tendo $A(q)$ como mônico.

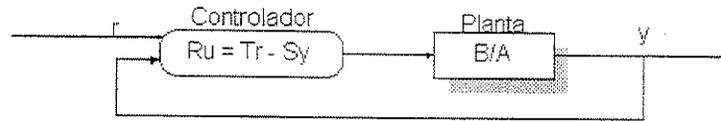


Figura 2.7: Diagrama de blocos de um sistema de malha fechada

Para o controlador usa-se um sinal de saída, u , e dois sinais de entrada: um sinal de referência, r , e uma medida do sinal de saída, y . O controlador é representado pela seguinte relação linear,

$$R(q)u(k) = T(q)r(k) - S(q)y(k), \quad (2.32)$$

onde $R(q)$, $S(q)$, e $T(q)$ são polinômios no operador avanço-unitário “ q ”. É usual escolher o polinômio $R(q)$ como mônico. Além disso para se ter um controlador causal é necessário que o grau de $R(q)$ seja maior ou igual ao grau de $S(q)$ e $T(q)$. A figura 2.7 mostra o diagrama de blocos que representa o controle polinomial descrito acima.

Pela figura 2.7 vê-se como o controlador atua sobre a planta. Foi aplicado à planta um controle polinomial discreto, tanto para estudos simulados quanto experimentais, de modo que em virtude das faixas de frequências estudadas, dois tempos de amostragem foram usados. Para um estudo na faixa de $0 - 500\text{Hz}$, um ΔT de 0.25ms e para a faixa de $0 - 78\text{Hz}$, um ΔT de 1.602ms . Esta amostragem está baseada no sinal de excitação que possui quatro pontos por período de amostragem. Assim, este tempo de amostragem muda desde que, o número de pontos por período do sinal de excitação, mude.

2.5.1 Solução da equação do controlador

Para que o sinal de controle, u , seja calculado é preciso que os polinômios, $R(q)$, $S(q)$ e $T(q)$ estejam disponíveis. Para tanto uma equação característica de malha fechada é determinada e através de solução algébrica os polinômios são determinados. O polinômio característico é,

$$A_{cl} = A(q)R(q) + B(q)S(q). \quad (2.33)$$

onde A_{cl} é dado pela igualdade dos produtos $A_{cl} = A_m A_o$. Por definição, A_m é o polinômio do controlador e A_o o polinômio do observador, cuja formulação matemática é dada por, $A_m = \det(zI - A + BK)$ e $A_o = \det(zI - A + CL)$. O modelo de referência é definido pelos polinômios A_m e B_m , sendo este último o numerador de tal modelo. O polinômio B_m foi considerado igual ao polinômio B do modelo calculado. Admitindo que o sistema seja controlável e observável, os ganhos K e L são projetados de modo a levar os pólos aos lugares desejados.

Ao contrário do procedimento acima, o polinômio A_m foi projetado de acordo com a equação abaixo.

$$A_m = [z^2 + 2 * \zeta * \omega_i + \omega_i^2] * [z^2 + 2 * \zeta * \omega_j + \omega_j^2], \quad (2.34)$$

onde ω_i e ω_j são as freqüências naturais e $\zeta = 0.707$, o fator de amortecimento desejado. A representação de A_m foi chamada como polinômio do modelo de referência.

Para o cálculo de A_o usou-se o procedimento apresentado, sendo o ganho L obtido pela formula de Ackermann, (Aström [31]), definida por

$$L = P(\Phi)W_o^{-1} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}^T. \quad (2.35)$$

Na equação 2.35 o termo $P(\Phi)$ é definido pela equação $P(\Phi) = \Phi^n + p_1 \Phi^{n-1} + \dots + p_n I$, onde os coeficientes dão os pólos desejados. O termo W_o representa a matriz de observabilidade. Por fim o termo $\begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}^T$ garantirá que o observador seja do tipo “deadbeat”, ou seja, todos os autovalores de $A - CL$ sejam zeros, o que em outras palavras garante a melhor performance possível do observador.

A equação 2.33 é conhecida como equação diofantina e representa um importante papel no controle polinomial, uma vez que é esta equação que fornece os parâmetros necessários aos cálculos da lei de controle. A maneira indicada de resolver a equação diofantina é pela seguinte relação matricial.

$$\begin{bmatrix} a_0 & 0 & \cdots & 0 & b_0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_1 & a_0 & \cdots & 0 & b_1 & b_0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & 0 & \vdots & \vdots & \cdots & 0 \\ a_n & a_{n-1} & \cdots & a_0 & b_n & b_{n-1} & \cdots & b_0 \\ 0 & 0 & \cdots & \vdots & 0 & 0 & \cdots & b_1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_n & 0 & 0 & \cdots & b_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r_0 \\ \vdots \\ r_n \\ s_0 \\ \vdots \\ s_{n-1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ c_{2n-1} \end{Bmatrix}$$

A solução desta equação fornecerá os parâmetros dos polinômios $R(q)$ e $S(q)$. Restando apenas o polinômio $T(q)$ ser calculado, que por sua vez pode ser obtido de uma maneira bastante simples, ou seja, $T(q) = \frac{A_m}{B} A_o$. Assim, admitindo que a planta está com um modelo representativo, pode-se implementar o controlador no sistema desejado.

2.6 Controle Adaptativo

O controle adaptativo usado foi do tipo autosintonizado. Este possui as mesmas características que o controle polinomial acrescido de uma estimação de parâmetros, que por sua vez é realizada “on-line”, por um algoritmo de estimação recursiva RLS. Uma completa descrição do controle autosintonizado pode ser obtido em Aström [32]. Na Figura 2.8 encontra-se o diagrama de blocos do controlador implementado. Este controle foi projetado no domínio discreto, de modo que sua análise foi realizada para uma faixa de frequência de $0 - 78Hz$.

Pela figura 2.8 pode-se aplicar o processo de controle autosintonizado. A planta recebe o sinal de controle u , resultando na saída y . Estes sinais atrasados, são processados pelo módulo RLS, o qual é responsável pela estimação recursiva dos parâmetros do modelo polinomial da planta. Mediante a estimação dos parâmetros da planta, o módulo Diofantina calcula os polinômios R e S e junto com a obtenção do polinômio T , a lei de controle é calculada e o sinal u é novamente aplicado à planta, reiniciando o ciclo.

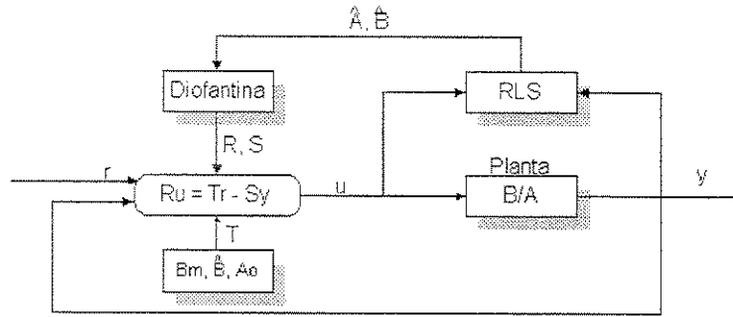


Figura 2.8: Controle auto-sintonizado da planta

Nota-se assim que os polinômios R , S , e T , são calculados a partir da estimação dos parâmetros da planta, levando-se a concluir que uma boa estimação é de extrema importância para o processo de controle. Apresenta-se abaixo o equacionamento do algoritmo RLS usado para estimação dos parâmetros [32].

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t) * \varepsilon(t)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)$$

$$K(t) = P(t-1)\varphi(t-1)(\lambda + \varphi^T(t-1)P(t-1)\varphi(t-1))^{-1}$$

$$P(t) = (I - K(t)\varphi^T(t-1))P(t-1)/\lambda, \quad (2.36)$$

onde $\hat{\theta}(t)$ é o vetor de parâmetros estimado no instante t , $\varepsilon(t)$ o erro da estimação, $K(t)$ um ganho usado para a estimação, $P(t)$ a matriz de covariância atualizada em tempo real e $\varphi^T(t)$ é chamado de vetor regressor definido por

$$\varphi^T(t) = \left(-y(t-1) \quad \cdots \quad -y(t-n) \quad u(t-d_o) \quad \cdots \quad u(t-d_o-m) \right).$$

Essas características qualificam o controle como um controlador adaptativo indireto, uma vez que o controle é realizado a partir dos parâmetros estimados da planta.

Por tratar-se de um método adaptativo alguns cuidados devem ser tomados no ato do projeto. Como notou-se, a equação Diofantina é calculada para cada iteração da estimação de parâmetros, o que implica que o número de parâmetros vai

- o influenciar na qualidade do controle e principalmente no tempo de processamento, pois o número de operações cresce com o quadrado da ordem do sistema e assim acaba existindo um limite no tempo de aquisição dos dados. Um outro fator importante é a questão da inicialização dos parâmetros a serem estimados pelo método. Uma boa inicialização afetará o tempo de convergência e conseqüentemente afetará a qualidade do controle aplicado à planta. Dessa maneira, antes da aplicação do controle, realizou-se uma estimação dos parâmetros para que com esta estimação fossem realizado os trabalhos simulados e experimentais e assim evitando o problema de instabilidade do controlador.

Capítulo 3

DETECÇÃO DE FALHAS

Este capítulo descreve os métodos de detecção de falha que usam o método dos observadores de estado e de saída. Aborda-se também a detecção através de uma rede neural artificial, que pode ser caracterizada, de uma forma geral, como estática e dinâmica. O objetivo foi usar uma rede neural dinâmica de modo a fazer uma estimação da resposta da planta, com informações de sinais de entrada e saída. Desse modo convencionou-se chamar a rede neural de “observador neural”.

3.1 Detecção por Observadores

Para que fique mais claro como realiza-se uma detecção de falha usando observadores, apresenta-se inicialmente uma breve explicação dos conceitos básicos da teoria de observadores. A primeira explanação será sobre observadores determinísticos e após isto, apresenta-se a formulação matemática do observador de saída, o qual tem a capacidade de realizar uma estimativa da resposta da planta.

Com relação aos observadores em geral, é necessário que se faça um monitoramento dos estados existentes em determinada planta, o que obriga o uso de sensores. Entretanto, a complexidade de uma planta pode necessitar de um grande número de estados a serem monitorados, tornando sua aplicação inviável economicamente. Um meio de superar esta dificuldade é através de modelos matemáticos capazes de estimar os estados a cada momento. A este modelo dá-se a denominação

de Observador, que é obtido mediante um modelo da planta, tendo como entradas as variáveis medidas e as entradas da planta, resultando em uma saída da estimativa do estado da planta. Assim, no caso determinístico, dois métodos são usados: Observador de Ordem Completa quando o estado é completamente estimado através das medições realizadas; e Observadores de Ordem Reduzidas, quando apenas uma estimativa parcial do estado é necessária, com as próprias medições compondo o restante do estado. O observador de ordem completa será explicado na próxima subseção.

3.1.1 Observadores de Ordem Completa

Quando apenas a saída está sendo medida, este tipo de observador pode ser usado para estimação completa dos estados a partir da medição da saída e do sinal de entrada da planta. A figura 3.1 mostra o diagrama de bloco do observador de ordem completa.

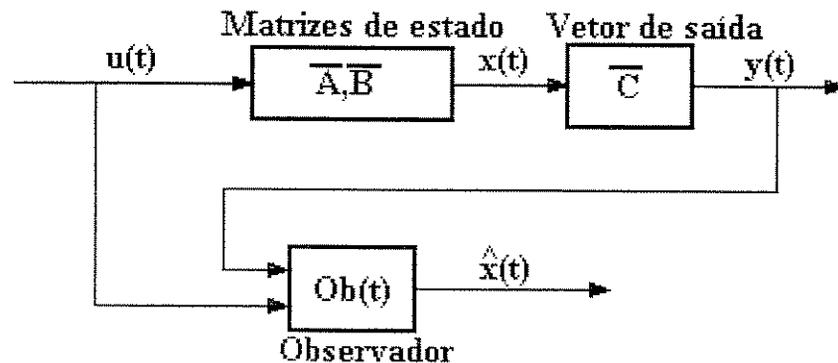


Figura 3.1: Diagrama de bloco do observador de ordem completa

Nesta Figura 3.1 nota-se que a estimativa dos estados $\hat{x}(t)$ é feita apenas com informações dos sinais de entrada e saída da planta (nesta subseção a variável x representa variáveis de estado). É no bloco "Ob(t)" que existe a formulação matemática responsável pela estimação dos estados.

Assim considerando uma planta de ordem n , com p entradas e q saídas, descrita pelo modelo

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \bar{A}x + \bar{B}u, \\ y &= \bar{C}x,\end{aligned}\tag{3.1}$$

é possível definir o observador usando a seguinte relação matemática.

$$\dot{\hat{x}} = \bar{A}\hat{x} + \bar{B}u + L(y - \bar{C}\hat{x}),\tag{3.2}$$

onde L é o vetor de realimentação do observador, \bar{A} , \bar{B} , e \bar{C} , são as matrizes de estado do modelo da planta. Notando que o erro do estimador pode ser definido como

$$\tilde{x} = x - \hat{x},\tag{3.3}$$

e derivando a equação acima nos dois lados, nota-se que

$$\dot{\tilde{x}} = (\bar{A} - L\bar{C})\tilde{x}.\tag{3.4}$$

A convergência do estimador depende assim da posição dos pólos da matriz $\bar{A} - L\bar{C}$. Quanto mais a esquerda no plano complexo estiverem os pólos, mais rápida será a convergência.

Não serão apresentadas as formulações do observador de ordem reduzida uma vez que não foram usadas no trabalho.

3.1.2 Observadores de Saídas Robustos

Este método foi o usado para realizar as detecções de falhas. A formulação apresentada mostra que o observador usado tem como função a reprodução dos sinais de saída da planta, tratando-se assim, de um observador de saída e não de estado. Com essa formulação conseguiu-se fazer uma comparação redundante entre os sinais medidos e analíticos, gerando-se um resíduo quando da ocorrência de uma falha. Teoricamente o resíduo para um sistema sem falhas é nulo, mudando de valor quando ocorre uma variação na planta. Entretanto, ruídos de medição, erros de modelagem, etc., causam perturbações normais. Assim, o resíduo será normalmente um pouco

diferente de zero. Em virtude disso admitiu-se uma tolerância para o disparo do alarme de falha, representado por um limiar a ser ultrapassado. A escolha do tipo de limiar é fundamental, uma vez que este fato implicará no maior ou menor número de alarmes falsos.

Considera-se o modelo de estado para a planta,

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx,\end{aligned}\tag{3.5}$$

onde \dot{x} é a derivada dos estados x , y a saída, A, B, C matrizes admitidas conhecidas.

Pela teoria de observadores robustos a saída da planta pode ser estimada da seguinte maneira (uma visão completa pode ser achada em Frank [11], [12], [8], Abbas [7], Xi [6]):

$$y(s) = G(s)u(s) + \Delta y(s) + H(s)f(s),\tag{3.6}$$

sendo $y(s)$ a transformada de Laplace da saída, $u(s)$ o sinal de entrada da planta controlado, $G(s)$ a função de transferência da planta, $H(s)$ a função de transferência do vetor de falhas $f(s)$, e $\Delta y(s)$ é a incerteza na resposta da planta.

O resíduo pode ser representado da seguinte forma,

$$r(s) = \hat{M}(s)(y(s) - G(s)u(s)),\tag{3.7}$$

onde $G(s) = \hat{M}^{-1}(s)\hat{N}(s)$ é uma fatoração em polinômios coprimos, Ding [9], da função de transferência da planta incluindo um observador de Luenberger de ganho L , tal que

$$\begin{aligned}\hat{M} &= I - C(sI - A + LC)^{-1}L \\ \hat{N} &= C(sI - A + LC)^{-1}B.\end{aligned}\tag{3.8}$$

Com essas equações, o resíduo pode ser escrito como,

$$r(s) = \hat{M}(s)y(s) - \hat{N}(s)u(s),\tag{3.9}$$

sendo tal equação equivalente à formulação dada abaixo,

$$r(s) = y(s) - \hat{y}(s), \quad (3.10)$$

onde \hat{y} é a saída estimada pelo observador. Pode-se concluir que o resíduo trata-se de um erro de estimação.

Usou-se um limiar adaptativo, que tem a função de acompanhar o comportamento normal da planta, cuja característica é variar de acordo com as perturbações normais. Assim o limiar escolhido para o estudo foi

$$J = \|\delta \hat{M}u\|, \quad (3.11)$$

onde δ é um limite estabelecido para a incerteza da planta e $\|\cdot\|$ representa uma norma a ser adotada, no caso o valor médio quadrático. A condição de alarme foi estabelecida pela seguinte condição, $\|r(s)\| > \|J\|$. Este limiar é definido como um limiar adaptativo linear, Frank [33].

3.2 Detecção por Redes Neurais

Antes da descrição de como foi usada a rede neural para detecção de falha, será dada uma breve explanação sobre redes neurais.

Redes neurais são modelos baseados no funcionamento do cérebro humano. Entretanto trata-se de um modelo simplificado quando comparado às atividades realizadas por um neurônio biológico. O cérebro é uma estrutura altamente complexa, não-linear que executa tarefas com muito mais eficiência que qualquer computador digital dos dias atuais, por exemplo, reconhecimento de padrões, percepção, e controle de movimento, Haykin [34].

Embora as atividades realizadas por uma rede neural, quando comparadas ao desempenho de um neurônio biológico, seja simples, tais atividades vem desenvolvendo uma importante função na área acadêmica. Inúmeros trabalhos de reconhecimento de padrão, controle de sistemas, diagnósticos, foram realizados com sucesso

Vogl *et al.* [35], Yu *et al.* [36], Marcu *et al.* [37], Naidu [38]. Pode-se ver que são atividades que são realizadas por um cérebro humano, uma vez que ambos estão lidando com uma palavra fundamental, "aprendizado". Uma rede neural possui a capacidade de realizar o que se chama de aprendizado, mesmo que seja muito mais limitado que a capacidade humana. Assim pode-se afirmar que uma rede neural é constituída de neurônio artificiais. Haykin [34], dá a seguinte definição para redes neurais.

Uma rede neural é um processador paralelo distribuído feito de unidades de processamento simples, que tem uma tendência natural para armazenamento de conhecimento adquirido através de experiências e disponibilização do mesmo para uso. A rede neural é similar ao cérebro em dois aspectos:

1. *O conhecimento é adquirido pela rede do seu ambiente através de um processo de aprendizagem.*
2. *Os pesos das conexões entre os neurônios, conhecidos como pesos sinápticos, são usados para armazenar o conhecimento adquirido.*

Pode-se afirmar dessa maneira que o neurônio artificial desempenha uma importante função no processo de aprendizado realizado por uma rede neural. Um neurônio é uma unidade que processa informações para operação de uma rede neural. A figura 3.2 mostra o modelo de um neurônio, que é a base de projeto de uma rede neural.

Na figura 3.2 identificam-se três elementos básicos de um modelo neuronal:

- Um grupo de conexões, dos quais cada um é caracterizado por pesos, ou seja, um sinal x_j que está na sinapse j é conectado ao neurônio k pelo peso sináptico W_{kj} . Ao contrário da sinapse do cérebro, os pesos sinápticos de uma rede neural artificial podem pertencer a um intervalo tanto de valores positivos quanto negativos.
- Um somador para somar sinais de entrada, ponderados pela respectiva sinapse do neurônio; esta operação é caracterizada por ser uma combinação linear.
- Uma função de ativação para limitar as amplitudes das saídas dos neurônios. Geralmente o intervalo usado para as saídas dos neurônios está entre $[0 \ 1]$ ou

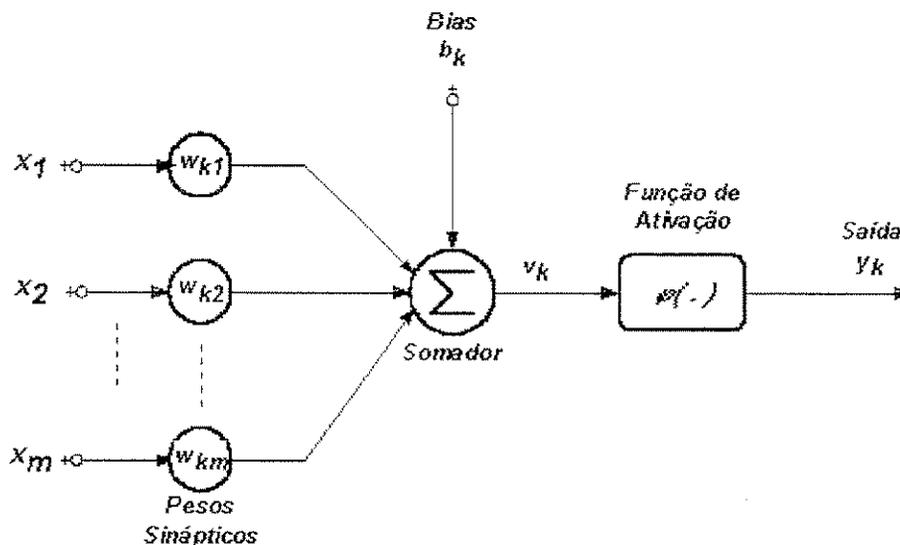


Figura 3.2: Modelo não-linear de um neurônio

$[-1 \ 1]$. Sendo que quem define é o tipo de função de ativação.

O modelo neuronal da figura 3.2 também inclui um parâmetro não comentado, "bias", representado por b_k . A sua função é aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação, dependendo para isto se o valor usado é positivo ou negativo.

Em termos matemáticos, pode-se representar um neurônio k pelos seguintes pares de equações:

$$u_k = \sum_{j=1}^m W_{kj} x_j, \quad (3.12)$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k), \quad (3.13)$$

onde x_j é o sinal de entrada, W_{kj} os pesos sinápticos do neurônio k , u_k é a saída devido uma combinação linear do sinal de entrada, b_k é o bias, $\varphi(.)$ é a função de ativação, e y_k é o sinal de saída do neurônio.

Como dito a função de ativação limita a saída do neurônio, e esta limitação dependerá do tipo escolhido. Segue abaixo os tipo de função de ativação mais usados.

- Função Limiar, conhecida também como *Função Heaviside*:

$$\varphi(v) = 1 \quad \text{se } v \geq 0$$

$$\varphi(v) = 0 \quad \text{se } v < 0$$

- Função Linear por intervalo:

$$\varphi(v) = 1 \quad \text{se } v \geq \frac{1}{2},$$

$$\varphi(v) = v \quad \text{se } \frac{1}{2} > v > -\frac{1}{2},$$

$$\varphi(v) = 0 \quad \text{se } v \leq -\frac{1}{2},$$

- Função sigmoide:

$$\varphi(v) = \frac{1}{1+e^{-av}}$$

- Função tangente-hiperbólica:

$$\varphi(v) = \frac{e^{av} - e^{-av}}{e^{av} + e^{-av}}$$

Com essas características é possível projetar-se um neurônio simples, que como dito é a base de uma rede neural artificial.

De uma maneira geral pode-se dizer que uma rede neural artificial funciona como um aproximador universal, que realiza processamentos paralelos e distribuídos, sendo necessário para tanto uma aprendizagem e generalização. Os tipos das redes neurais são classificados segundo sua conectividade, e são divididas em dois grandes grupos, redes neurais estáticas e redes neurais dinâmicas.

3.2.1 Redes neurais estáticas

O que caracteriza uma rede neural estática é o fato dela não possuir memória, Wasserman [39], ou seja, as saídas da rede neural são funções que dependem apenas das entradas atuais e não das saídas e/ou entradas atrasadas. A topologia deste tipo de rede neural mais usada, são as redes de múltiplas camadas, "multilayer perceptron (MLP)", e as redes de funções de base radial, "radial basis function (RBF)", Haykin[34].

Uma rede neural do tipo múltiplas camadas caracteriza-se por possuir uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias (ou ocultas) e uma camada de saída. O sinal de entrada é propagado através da rede na direção da camada de saída, passando por todas as camadas intermediárias. A figura 3.3 mostra a arquitetura da rede neural descrita.

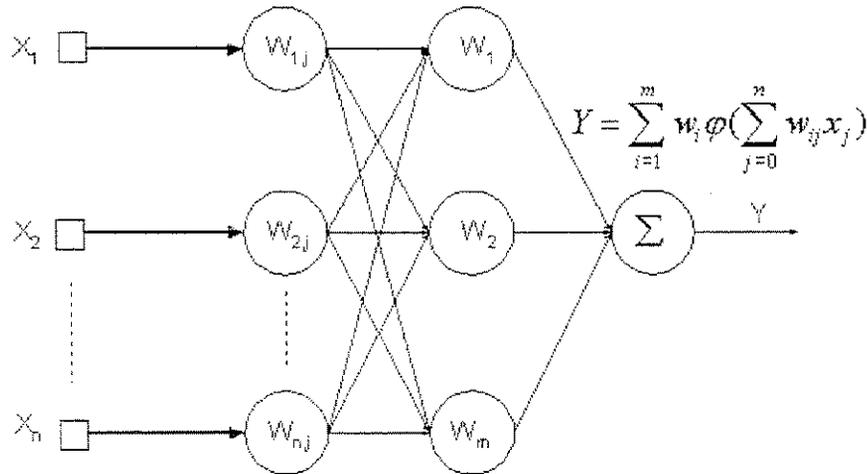


Figura 3.3: Perceptron de múltipla camada

O método de treinamento mais usado para este tipo de rede é a técnica de aprendizado conhecida como propagação reversa (backpropagation), que consiste basicamente de duas fases, uma chamada fase de avanço (forward pass) e outra fase de retorno (backward pass). Na fase de avanço, padrões são acionados às camadas de entrada, o que passará por toda estrutura da rede neural, e como resultado um grupo de saídas é produzido. Estas saídas são comparadas às respostas desejadas, resultado assim em erros instantâneos. Com isso dá-se início à segunda fase, onde os erros são passados pelas camadas em sentido oposto ao da fase de avanço. Neste caminho dos erros, os pesos sinápticos são atualizados, para que uma nova fase de avanço seja feita, com os pesos fixos, produzindo um novo grupo de saídas e por fim um novo grupo de erros. Este processo continua até que os erros se encontrem em valores baixos, caracterizando o fim do treinamento da rede neural.

O algoritmo de atualização de pesos é dado por, $\omega_{ji}(n+1) = \omega_{ji}(n) + \Delta\omega_{ij}(n)$, onde:

$$\Delta\omega_{ij}(n) = \alpha\Delta\omega_{ij}(n-1) + \eta\delta_j(n)y_i, \quad (3.14)$$

sendo α definido como momento, η a taxa de aprendizado, e δ_j uma função gradiente. Esta função gradiente é definida como,

$$\delta_j = e_j^L(n)\varphi_j'(v_j^L(n)) \quad \text{camada de saída L}$$

$$\delta_j = \varphi_j'(v_j^l(n)) \sum_k \delta_k^{l+1}(n)\omega_{kj}^{l+1}(n) \quad \text{camada oculta L} \quad (3.15)$$

onde e_j^L é o erro da camada de saída L que será propagado para as camadas anteriores.

Uma das aplicações mais comuns é a classificação de padrões, uma vez que foi demonstrado que qualquer função contínua que representa padrões pode ser aproximada por uma rede neural multi-camadas com uma única camada escondida, o que para tanto deve haver quantidade suficiente de neurônios, Hornik [40].

As redes neurais de base radial caracterizam-se por possuírem três camadas, sendo uma de entrada, uma oculta e a última de saída. Esta topologia pode ser vista na figura 3.4.

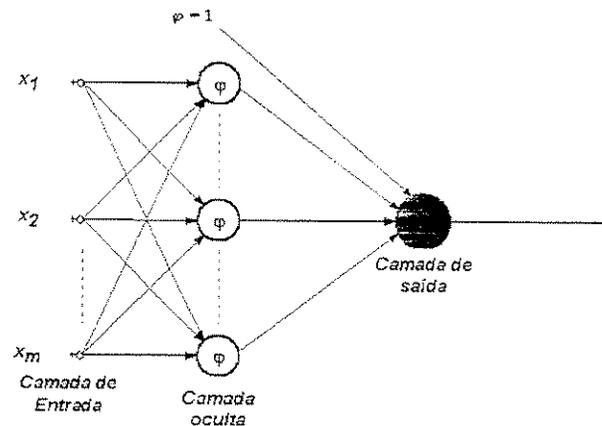


Figura 3.4: Rede Neural RBF

As saídas são produzidas por combinação linear das funções de ativação dos neurônios, localizadas na camada intermediária. Na camada oculta encontram-se as funções de ativação que são do tipo Gaussiana ou qualquer outra função de base radial. Estas funções caracterizam-se por produzir respostas significativas somente quando os estímulos das entradas estão localizados na região próxima ao centro da gaussiana.

3.2.2 Redes neurais dinâmicas

As redes neurais dinâmicas caracterizam-se por possuir capacidade recursiva, o que possibilita a formação de "memória" da rede. As equações deste tipo de rede neural são descritas por equações diferenciais ou por equações de diferenças. O processo de criar memória pode ser feito de duas formas, pelas redes neurais de dinâmica externa ou pela de dinâmica interna.

Redes neurais com dinâmica externa

O processo neural de dinâmica externa caracteriza-se por realizar atrasos nas entradas e nas saídas da rede neural. Narendra [20] afirma que as redes do tipo MLP podem simular redes dinâmicas utilizando os atrasos de extensão finita dos sinais de entrada e saída. A figura 3.5 mostra a dinâmica da rede, com seus respectivos atrasos.

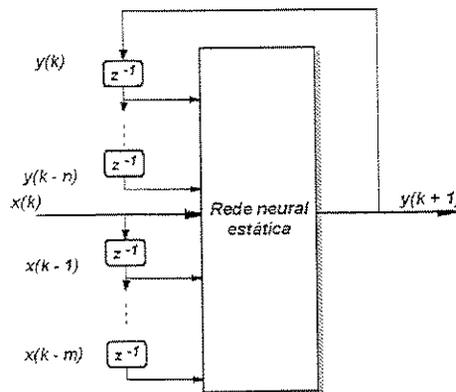


Figura 3.5: Rede neural com dinâmica externa

Na figura 3.5 nota-se que a saída $y(k+1)$ é função das saídas anteriores, $y(k-1), \dots, y(k-n)$, da entrada $x(k)$ e das entradas atrasadas, $x(k-1), \dots, x(k-m)$. Este tipo de rede também é conhecido como "time delay neural network (TDNN)", Haykin [34], e podem ser apresentadas pela seguinte formulação:

$$y(k+1) = f(x(k), x(k-1), \dots, x(k-m), y(k), \dots, y(k-n)). \quad (3.16)$$

Redes neurais com dinâmica interna

A figura 3.6 mostra um diagrama de blocos de uma rede neural chamada de "modelo de espaço de estado", Haykin [34]. Este modelo de rede neural define uma rede neural de dinâmica interna.

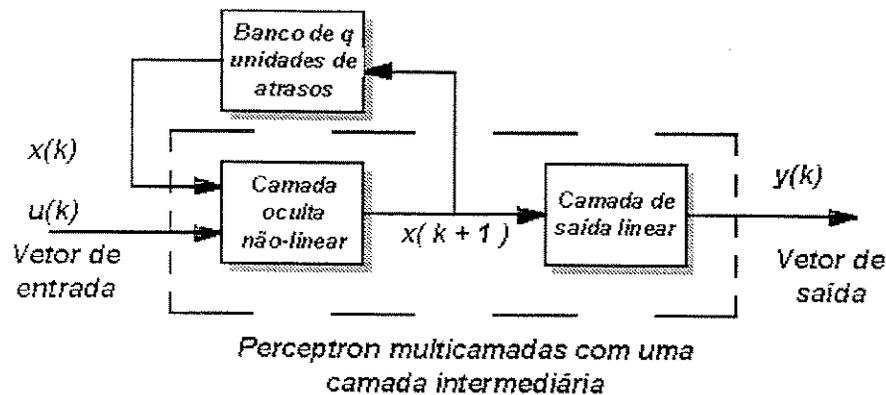


Figura 3.6: Rede neural com dinâmica interna

As camadas intermediárias definem os estados da rede, enquanto as saídas das camadas intermediárias são usadas nas camadas de entrada através do uso de um banco defasador. Assim a camada de entrada consiste dos sinais de excitação atual mais os sinais atrasados das saídas das camadas intermediárias. Além disso a saída da rede é realizada através de uma camada linear de ativação. Dessa maneira a ordem da rede neural usada será definida pelo número de atrasos usados no bloco que realiza os atrasos. Dessa maneira pode-se descrever o comportamento dinâmico da rede neural pelo seguinte par de equações acoplados:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)),$$

$$y(k) = Cx(k), \quad (3.17)$$

onde $f(.,.)$ é uma função não - linear que caracteriza uma camada intermediária, e C é uma matriz de pesos sinápticos que caracteriza a camada de saída. A camada intermediária é não-linear, mas a camada de saída é linear.

3.2.3 Escolha da rede neural para detecção de falha

Como visto uma rede neural pode possuir processamento estático ou dinâmico, esta última podendo ser interna ou externa. O objetivo da detecção de falha realizada por redes neurais é efetuar uma detecção durante o processamento dinâmico da planta, necessitando portanto de redes neurais dinâmicas. Além disso, a detecção deveria ser feita com informações atrasadas dos sinais de perturbação da planta e sinais das respostas da planta, também atrasados. Assim além da rede ser dinâmica, adotou-se uma dinâmica externa. Dessa maneira foi possível a construção de uma rede neural que estimasse a saída da planta em tempo real, e por isso foi convencionalmente chamado tal rede de "observador neural".

A figura 3.7 mostra o esquema de treinamento usado nas simulações e nos trabalhos experimentais.

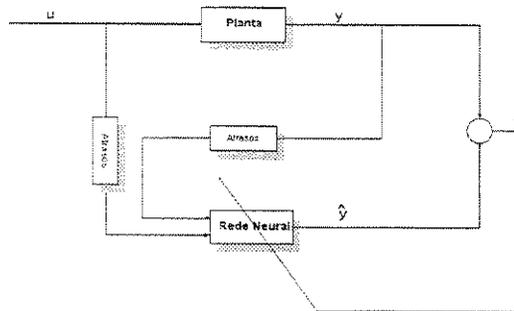


Figura 3.7: Diagrama de blocos usado no treinamento neural

Para o treinamento deste observador neural foram usados o sinal de perturbação (que não necessariamente precisa ser igual ao sinal usado no processo de detecção) e a saída da planta atrasada. O número de neurônios e das camadas foi determinado pela observação dos resultados obtidos no treinamento.

A topologia usada para o treinamento é mostrada na figura 3.8.

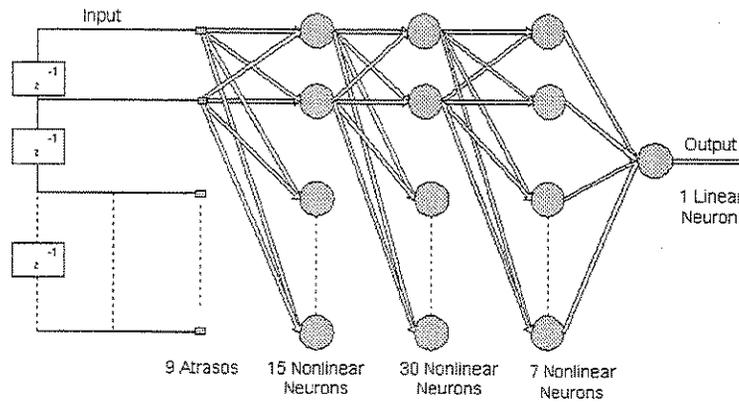


Figura 3.8: Arquitetura do treinamento neural

Com o treinamento realizado, a tarefa de detecção da falha foi executada pela comparação entre o resíduo $y - \hat{y}$ e o limiar adaptativo $J = \|\delta \hat{M}u\|$, conforme explicado anteriormente.

Capítulo 4

RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS DA VIGA COM E SEM FALHA

Este capítulo mostra os resultados simulados e experimentais obtidos com a viga flexível considerando os seguintes tipos de falhas: adição de massa em três pontos diferentes da viga e aparecimento de uma trinca, sendo o estudo da trinca realizado apenas por meio de simulações. Os resultados consistem na resposta sem controle e controlada pelo método polinomial e adaptativo autosintonizado para as condições com e sem falha. Mostra-se também a identificação experimental realizada. A excitação em todos os casos foi com um sinal de Schroeder com duas faixas de perturbação, 0 a $78Hz$ e 0 a $500Hz$. Uma completa descrição do sinal de Schroeder pode ser achada em, Pablo [41] e em Schroeder [42]. Estas duas faixas de análise justificam-se pela necessidade de estudo dos modos de vibração em faixas distintas. Por fim, encerra-se o capítulo com análise dos resultados dentro do enfoque de detecção de falha.

4.1 Resultados Simulados

Esta seção mostra os resultados simulados da viga flexível. Inicialmente para a ocorrência de trinca tendo uma profundidade de 30% da altura da seção transversal da viga, sob o efeito de um controle adaptativo autosintonizado. Em seguida, o estudo do efeito dos controladores polinomial e adaptativo para o caso de adição de massa nas três posições definidas no capítulo 2.

4.1.1 Simulação de Trinca com Controle Adaptativo

Antes de mostrar o efeito do controlador na viga flexível, mostra-se nas Figuras 4.1 e 4.2 a estimação de parâmetros da viga flexível realizada na planta. Tanto para a estimação de parâmetros quanto para execução do controle, foi usado um sinal de perturbação na forma de onda quadrada, com período de 4 segundos e amplitude zero a pico de $1e - 5$ Newtons. Nestas figuras notam-se o início e o final da estimação dos parâmetros, sendo que na figura 4.2 vê-se um comportamento estável dos valores. Esta estimação foi repetida em blocos de dez segundos, ou seja, ao final de cada dez segundos os parâmetros, caso não atendessem ao critério de convergência, eram salvos e usados como valores iniciais de uma nova estimação. Este processo repetiu-se até a estimação correta dos parâmetros. Como este processo ocorreu antes do controlador, foi possível que os parâmetros fossem inicializados com valores corretos para atuação do controle autosintonizado.

Com os valores inicializados adequadamente, a resposta controlada da planta é rápida e com um pequeno sobressinal. Como o objetivo do controle adaptativo é obter uma resposta da planta igual ou muito próxima à resposta do modelo de referência, uma boa inicialização dos parâmetros possibilita uma rápida convergência do método. O resultado obtido com a atuação do controle encontra-se na Figura 4.3 e na Figura 4.4, sendo que esta última figura mostra o efeito da trinca na resposta controlada.

Nota-se pelas figuras 4.3 e 4.4 que a saída da planta seguiu a saída do modelo de referência até o aparecimento da trinca que causa mudanças nas amplitudes

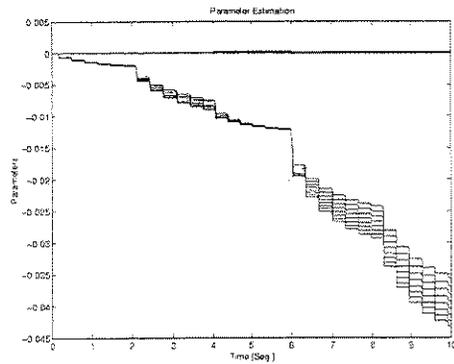


Figura 4.1: Durante a estimação de parâmetros para a viga flexível

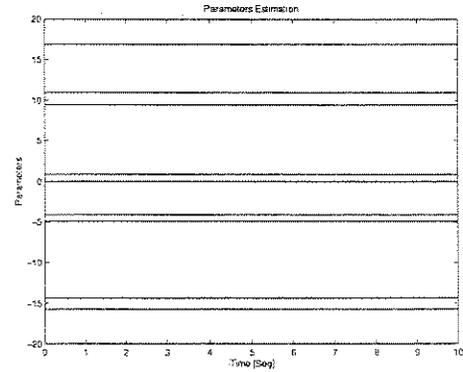


Figura 4.2: Final da estimação de parâmetros para a viga flexível

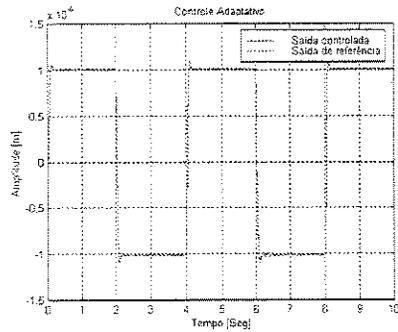


Figura 4.3: Resposta da viga flexível submetida ao controle autosintonizado

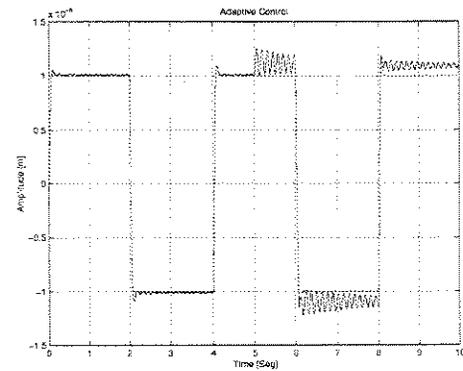


Figura 4.4: Resposta da viga flexível com trinca submetida ao controle autosintonizado

controladas. Nota-se que as amplitudes tem uma tendência de acomodação, mas que não é visto o comportamento final devido às escalas usadas. Um fato importante é que, porque os valores para os polinômios da planta foram inicializados adequadamente antes da atuação do controlador, isto evitou oscilações na saída durante a estimação dos parâmetros, e dessa forma foi assegurado o bom desempenho mostrado.

4.1.2 Simulação da Adição de Massa sem Controle

Esta seção mostra os resultados simulados das respostas a um sinal de Schroeder, sem controle, quando a esta é adicionada uma massa de $0,4Kg$ nas posições 1 ($25cm$ do engaste), 2 ($45cm$ do engaste), e 3 ($75cm$ do engaste). Para fazer as simulações, o modelo da viga flexível foi discretizado à uma taxa de $0.25ms$ e a resposta obtida por meio de um processamento discreto (a resposta $y(k)$ calculada em função das respostas $y(k-1) \cdots y(k-N)$ e das entradas $u(k) \cdots u(k-M)$, onde N é a ordem do polinômio do denominador da função de transferência e M a ordem do polinômio do numerador da mesma função de transferência).

A resposta, no domínio do tempo, sem atuação de controladores na viga, sem adição de massa, correspondente a faixa de 0 a $500Hz$ é mostrada na Figura 4.5 (neste capítulo será adotado chamar resposta sem atuação do controlador como *resposta*).

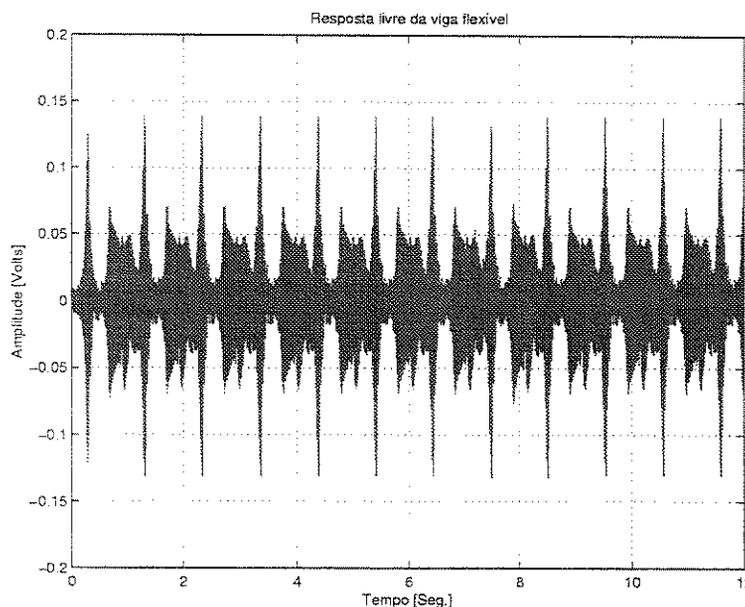


Figura 4.5: Simulação da resposta da viga flexível, no domínio do tempo na faixa de 0 a $500Hz$

Na Figura 4.5 nota-se que a maior amplitude está em torno de 0,15 volts. A simulação possui uma escala máxima de tempo de 12 segundos

Na Figura 4.6 vêem-se as respostas da viga. São mostradas quatro curvas que representam a resposta sem adição de massa e as adições da massa nas posições 1, 2, e 3. Esta disposição das curvas será adotada em todo o restante da dissertação. Para efeito comparativo mostra-se as quatro curvas na mesma escala e como consequência a primeira curva, representando a respostas de estado saudável, não é visualizada adequadamente.

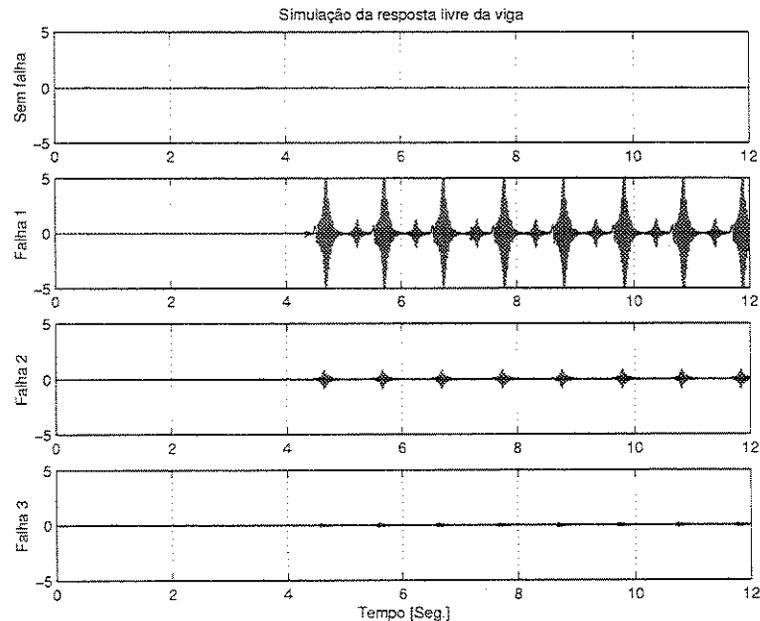


Figura 4.6: Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio do tempo na faixa de 500Hz

Na Figura 4.6 notam-se as quatro curvas referentes a resposta da viga flexível. A segunda mostra a massa sendo adicionada na posição 1 durante a medição, vê-se que a resposta muda sensivelmente em torno dos 5 segundos, que é o instante aproximado da adição da massa. Nota-se que ocorreu uma amplificação das amplitudes, chegando ao valor máximo da escala do gráfico, 5volts. A terceira curva mostra que as oscilações mudam também em torno dos 5 segundos de medição. Nota-se que a massa causa uma amplificação das amplitudes, mas com intensidade menor que na

primeira falha. O novo comportamento da resposta permanece durante o restante da medição. Na quarta curva nota-se que as mudanças nas amplitudes também permanecem durante todo o restante das medições, mas observando uma pequena variação nas amplitudes.

A representação espectral das curvas acima são vistas na Figura 4.7, onde as amplitudes estão em dBs, assim como em todos os gráficos em frequência. Estas curvas foram calculadas fazendo-se as FRFs (relação dos sinais de saídas e entradas) das curvas no domínio discreto de tempo, sendo que no caso das curvas com falha o cálculo foi feito sem o comportamento do transiente.

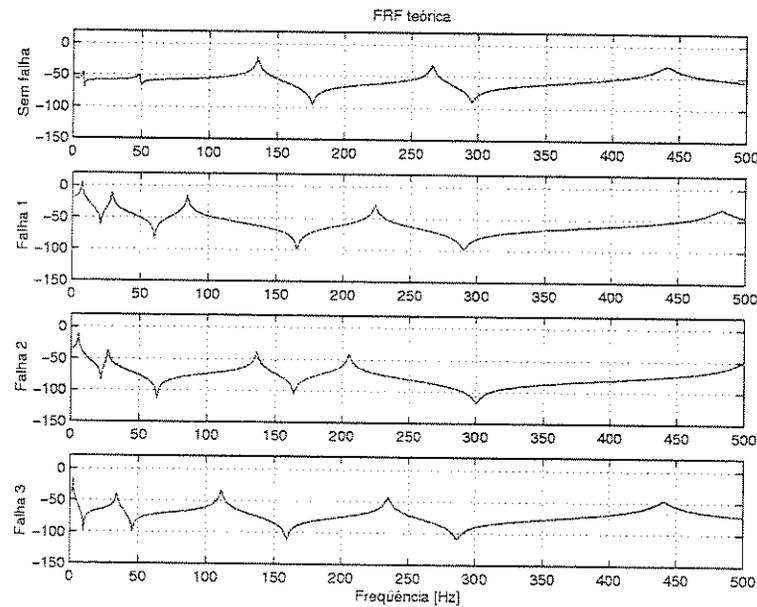


Figura 4.7: Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio da frequência na faixa de 0-500Hz

Na Figura 4.7 quatro espectros estão apresentados, para a frequência máxima de 500Hz . A primeira curva representa o espectro de estado saudável da viga. Este primeiro espectro será comparado com os espectros referentes à viga com massa adicional. Todas as análises em frequências seguiram este padrão, ou seja, todos os espectros comparados ao primeiro espectro mostrado na figura. Notam-se cinco picos de frequências naturais e quatro anti-ressonâncias. Percebe-se que o terceiro pico é que

possui maior amplitude, quando comparado aos demais picos. Os valores destes picos, que representam as frequências naturais, podem ser encontrados no capítulo que trata da identificação experimental da viga flexível. Para o segundo espectro percebe-se que possui cinco frequências naturais e quatro anti-ressonâncias. Além disso, ocorre uma pequena redução nos valores das quatro primeiras frequências naturais, enquanto a quinta natural sofreu um aumento do seu valor. As primeiras duas frequências naturais são amplificadas, tornando-se predominantes, e da terceira à quinta frequência de ressonância não percebe-se grandes alterações nas amplitudes. No terceiro espectro são notados quatro picos de ressonâncias e quatro de anti-ressonâncias. O primeiro e o segundo pico mostram uma redução na suas frequências, além de um aumento de amplitude. A frequência do terceiro e quarto modo sofreu uma redução, mas sem grandes alterações nas amplitudes. A frequência do quinto modo não é vista neste espectro. No quarto espectro, podem-se notar cinco frequências naturais e quatro anti-ressonâncias. Percebe-se uma redução em todas as frequências naturais, mas com maior intensidade na primeira e terceira natural. Das três situações de falha, é nesta que nota-se uma menor variação nas amplitudes.

A representação da resposta da viga sem adição de massa na faixa de 0 a $78Hz$ é vista na Figura 4.8.

Na figura 4.8 pode-se ver que a maior amplitude está em torno de 0,015 volts. A Figura 4.9 mostra a simulação da resposta da viga, sem e com adição de massa, no domínio do tempo na faixa de 0 – $78Hz$.

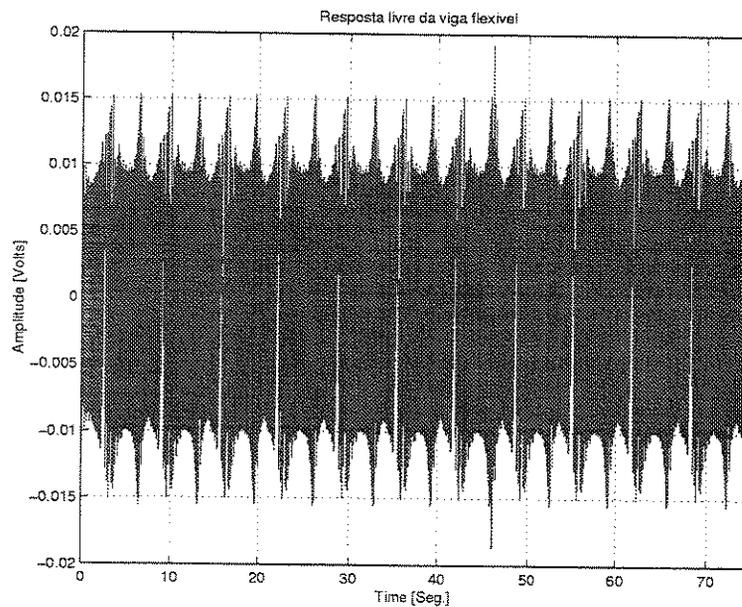


Figura 4.8: Simulação da resposta da viga flexível, no domínio do tempo na faixa de 0-500Hz

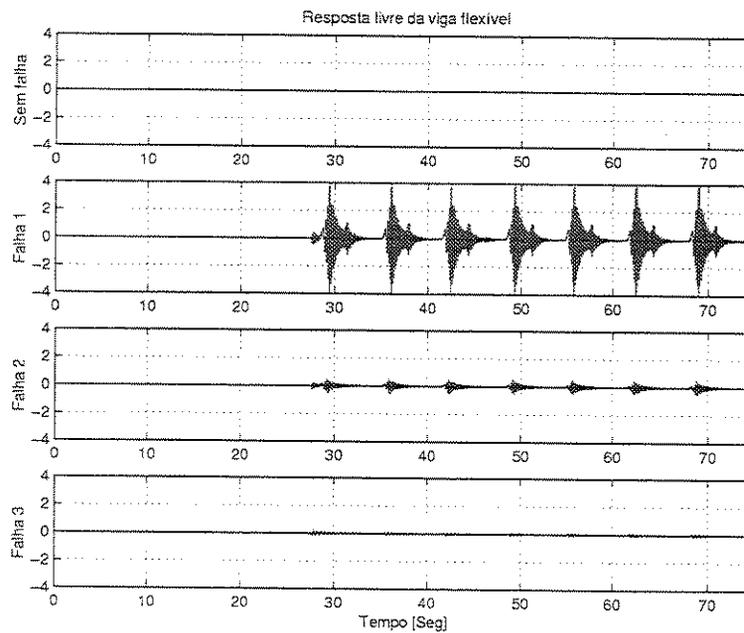


Figura 4.9: Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.9 notam-se quatro curvas distintas, com tempo máximo de simulação de 75 segundos. A primeira curva representa o estado saudável da viga. NA segunda vê-se que a resposta muda quando comparada com a própria resposta antes dos 30 segundos, que é o tempo aproximado da adição da massa. Nota-se que a adição da massa nesta posição causa uma amplificação das amplitudes, chegando ao valor máximo da escala do gráfico, 4volts. Nota-se que a resposta da viga passa a ser diferente da resposta sem adição de massa. A terceira curva, mostra que as oscilações mudam em torno dos 30 segundos de medição. Nota-se que a massa causa uma amplificação das amplitudes, mas com intensidade menor que a primeira falha. O novo comportamento da resposta permanece durante o restante da medição. Na quarta curva nota-se que as mudanças nas amplitudes permanecem durante todo restante das medições, mas observando uma pequena variação nas amplitudes.

A Figura 4.10 mostra a simulação da resposta da viga, sem e com adição de massa, no domínio da freqüência na faixa de 0 – 78Hz.

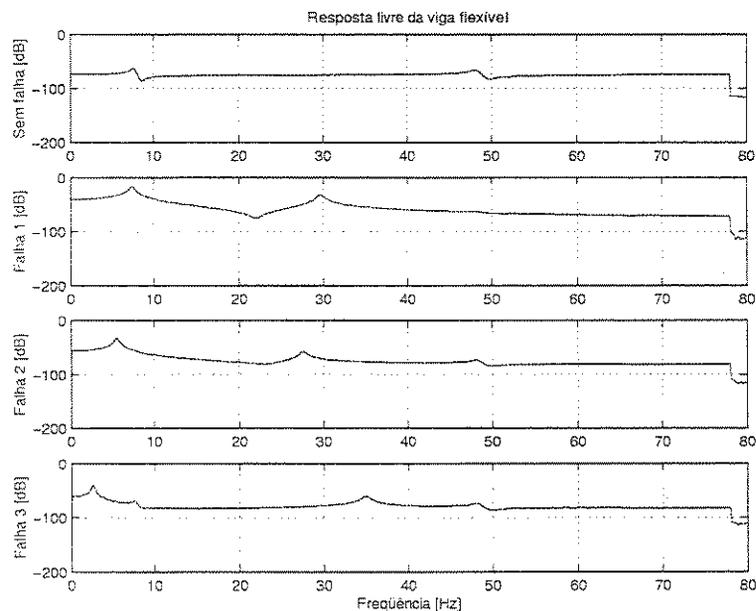


Figura 4.10: Simulação da resposta da viga flexível, com adição de massa, no domínio da freqüência na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.10 notam-se quatro espectros, onde na primeira curva vê-se dois

picos de frequências naturais e duas anti-ressonâncias. Percebe-se que as amplitudes dos picos são praticamente equivalentes, em torno de $-50dB$. No segundo espectro percebe-se duas frequências naturais e uma anti-ressonância. Além disso, ocorre uma pequena redução no valor da primeira frequência natural, enquanto a segunda natural sofreu uma redução significativa. As duas frequências naturais são amplificadas, chegando próximo a $0dB$. Aqui percebe-se que a amplificação da primeira natural foi mais forte que a segunda. No terceiro espectro, são notados dois picos de ressonâncias e nenhuma anti-ressonância. O primeiro e o segundo pico mostram uma redução mais acentuada nas suas frequências, mas com uma amplificação das amplitudes menor do que para a falha 1. No quarto espectro, pode-se notar duas frequências naturais e nenhuma anti-ressonância. Percebe-se a maior redução na primeira frequência natural, mas o mesmo não acontece com a segunda natural. Das três situações de falha, é nesta que nota-se a menor variação nas amplitudes.

4.1.3 Simulação da Adição de Massa com Controle Polinomial

Esta seção trata dos resultados simulados das respostas da viga ao controle polinomial, quando a este sistema é adicionado uma massa nas três posições previamente definidas.

A Figura 4.11 mostra a resposta sem falha da viga ao controle polinomial no domínio do tempo e na faixa de $0 - 500Hz$.

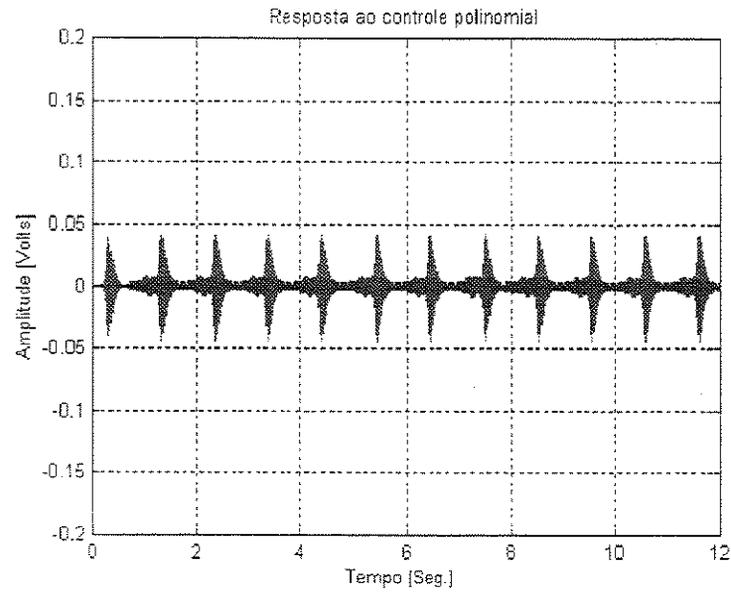


Figura 4.11: Simulação da resposta saudável da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.11 nota-se que a amplitude máxima das oscilações é próximo a 0,05volts. Percebe-se que a resposta possui características periódicas, sem que se veja mudança nas respostas controladas.

A Figura 4.12 mostra a simulação da resposta da viga ao controle polinomial, na faixa de 0 – 500Hz para as quatro situações de falha previamente definidas.

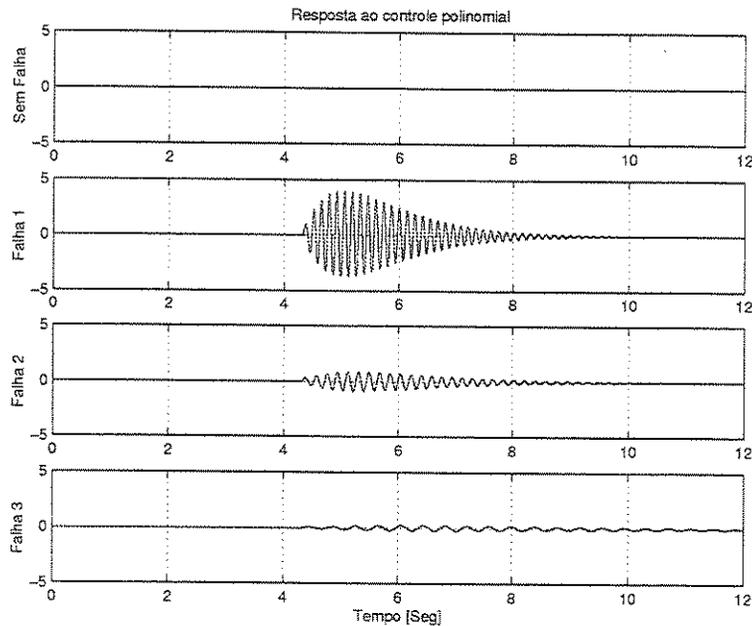


Figura 4.12: Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.12 notam-se quatro curvas distintas, com tempo máximo de simulação de 12 segundos. A primeira curva representa o estado saudável da viga. Na segunda curva vê-se que a resposta não muda quando comparada com a mesma resposta antes dos 4,8 segundos, que é o tempo da adição da massa. Nota-se que a adição da massa nesta posição causa uma amplificação das oscilações, chegando ao valor máximo da escala do gráfico, 5volts. Na terceira curva nota-se que a massa causa uma amplificação, mas com intensidade menor que a primeira falha. A quarta curva mostra que a adição de massa causou uma modificação muito menor que os defeitos anteriores.

A Figura 4.13 mostra a resposta controlada da viga no domínio da frequência

na faixa de $0 - 500\text{Hz}$.

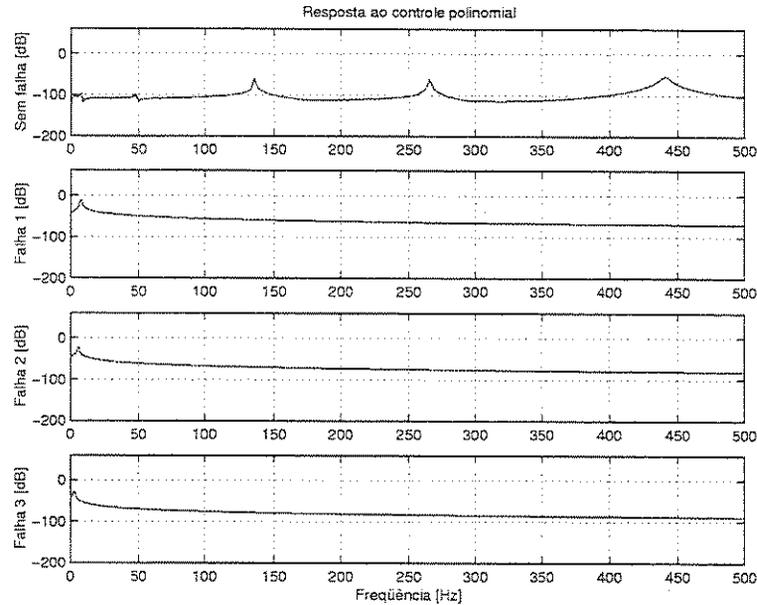


Figura 4.13: Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio da frequência

Na Figura 4.13 notam-se quatro espectros, onde a primeira curva representa o espectro de estado saudável da resposta controlada da viga. Notam-se cinco picos de frequências naturais e nenhuma anti-ressonância. Percebe-se que as amplitudes dos picos estão em torno dos -100dB , onde o maior pico é a terceira natural. Nos demais espectros nota-se que a primeira natural passou a dominar o sistema e o restante das frequências naturais passaram a não serem vistas. As diferenças entre as curvas estão em que a segunda possui a maior amplitude, enquanto a quarta curva possui a menor amplitude dos espectros que representam a resposta controlada da viga com adição de massa nas três posições. É bom lembrar que as massas são adicionadas separadamente em cada posição.

Para mostrar o efeito do controle na viga flexível, a tabela 4.1 mostra as amplitudes de cada frequência natural para as situações com e sem controle.

Nota-se pela tabela que todas as frequências naturais foram atenuadas, e que a menor atenuação ocorreu na quinta frequência natural e a maior atenuação na

Tabela 4.1: Tabela comparativa entre as respostas livres e controladas

Naturais	Sem Controle [dB]	Com Controle [dB]	Δ (%)
Primeira	-63,92	-99,94	56,35
Segunda	-66,96	-99,64	48,81
Terceira	-41,87	-59,36	41,77
Quarta	-50,23	-60,12	19,69
Quinta	-47,95	-54,04	12,70

primeira natural.

A Figura 4.14 mostra a resposta saudável da viga ao controle polinomial no domínio do tempo e na faixa de 0 – 78Hz.

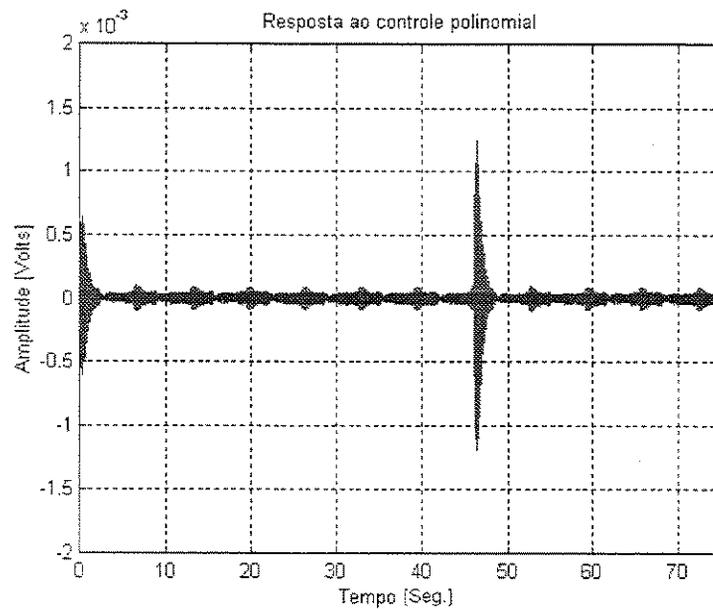


Figura 4.14: Simulação da resposta saudável da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.14 nota-se que a amplitude máxima das oscilações é próxima a 0,005volts. Percebe-se que a resposta possui características periódicas, mas nota-se um pico de grande valor em torno dos 50 segundos, voltando depois de um certo tempo para amplitudes mais baixas, as quais foram vistas durante a maior parte da simulação. O motivo da mudança nas amplitudes perto dos 50 segundos é porque a

viga foi perturbada com um sinal de Schroeder constituído de vários blocos, de modo que o total de tempo da perturbação é próxima aos 50 segundos. Entretanto o tempo desejado de simulação era de 75 segundos, então perto dos 50 segundos o sinal passa novamente ao ponto inicial, causando a variação nas amplitudes.

A Figura 4.15 mostra a resposta da viga ao controle polinomial nas situações de falhas conhecidas.

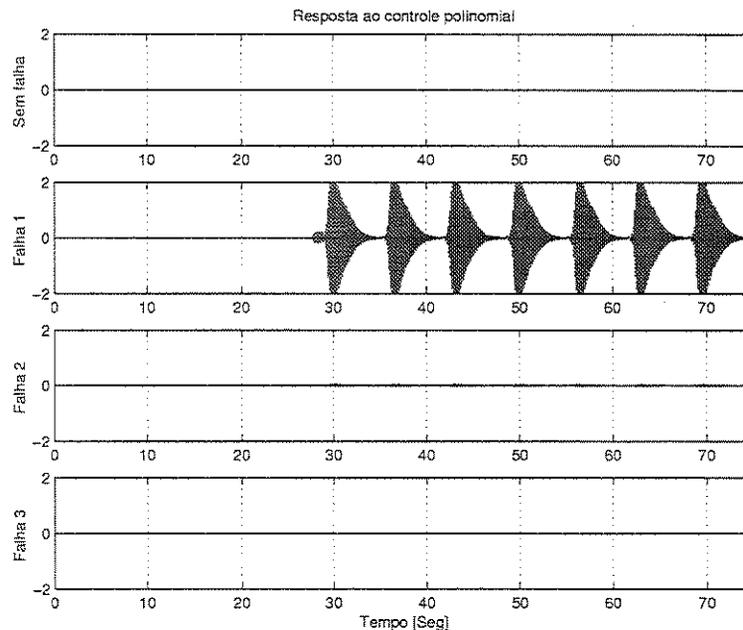


Figura 4.15: Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.15 percebem-se quatro curvas, com tempo máximo de simulação de 75 segundos. A primeira curva representa o estado saudável da viga. A segunda curva mostra a resposta controlada e vê-se que a resposta muda quando comparada com a mesma resposta antes dos 30 segundos, que é o tempo aproximado da adição da massa. Nota-se que a adição da massa nesta posição causa uma amplificação das amplitudes, chegando ao valor máximo da escala do gráfico, 2volts. Na terceira curva vê-se que as oscilações mudam em torno dos 30 segundos de medição. Nota-se que a massa causa uma amplificação das amplitudes mas com intensidade menor que a primeira falha, onde as mudanças vistas são muito pequenas na escala

usada. Na quarta curva, devido à escala usada, não percebe-se nenhuma alteração nas amplitudes.

A Figura 4.16 mostra as simulações das respostas da viga flexível ao controle polinomial, no domínio da frequência e na faixa de $0 - 78Hz$.

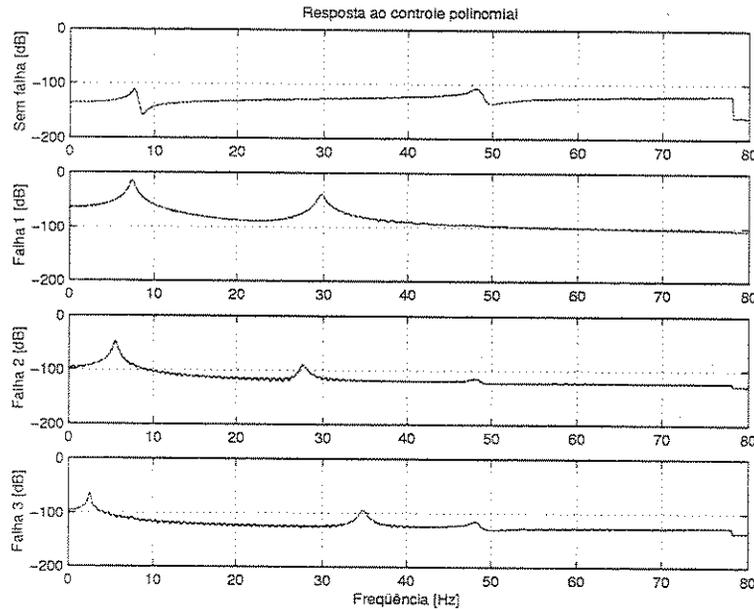


Figura 4.16: Simulação da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio da frequência

Na Figura 4.16 notam-se quatro espectros, onde na primeira curva vê-se dois picos de frequências naturais e uma anti-ressonância. Percebe-se que as amplitudes dos picos estão abaixo dos $-100dB$. No segundo espectro vê-se que os dois picos de ressonância foram amplificados, chegando estes valores próximos de $0dB$. Percebe-se ainda que as frequências sofreram uma redução. O terceiro espectro mostra que ocorreu uma amplificação nas amplitudes dos picos mas com menor intensidade que a falha 1. Percebe-se que as duas frequências naturais foram ainda mais reduzidas. Com o quarto espectro percebe-se que os picos de ressonância foram novamente amplificados mas com a menor intensidade entre todas as falhas simuladas. Vê-se, entretanto, que a primeira natural possuiu a maior redução de todas as falhas enquanto a segunda frequência natural foi reduzida mas permaneceu com um valor maior que as mesmas

frequências naturais das falhas 1 e 2.

4.1.4 Simulação da Adição de Massa com Controle Adaptativo

Esta seção mostra as simulações do controle adaptativo autosintonizado realizado na faixa de $0 - 78Hz$. Estas simulações mostram também como as respostas controladas comportaram-se quando uma massa foi adicionada nas posições 1, 2, e 3.

A Figura 4.17 mostra a resposta da viga ao controle adaptativo autosintonizado, no domínio do tempo na faixa de $0-78Hz$, para a viga com e sem massa.

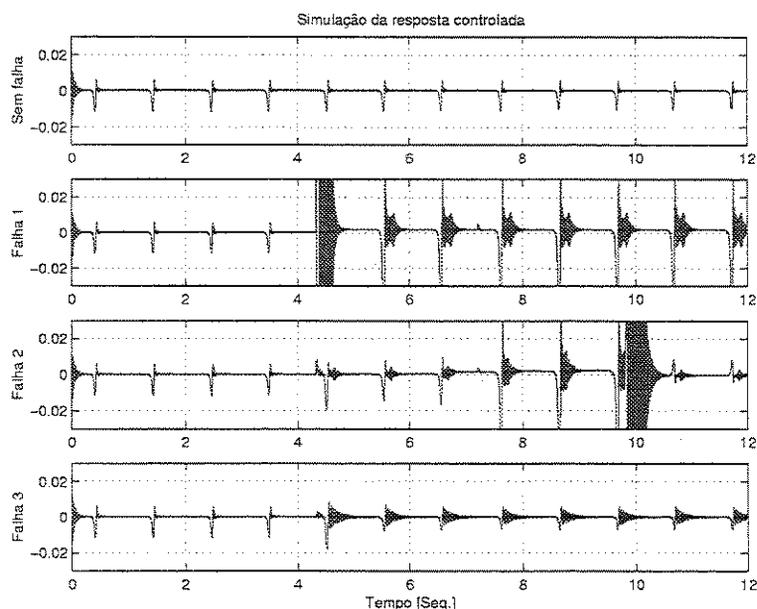


Figura 4.17: Simulação da resposta da viga ao controle adaptativo no domínio do tempo na faixa de $0-78Hz$

Na Figura 4.17 percebe-se que na primeira curva o comportamento permanece o mesmo durante todo o período de medição. Na segunda curva nota-se que em torno de 4,5 segundos as amplitudes de oscilação mudam, mas após algum tempo vê-se que uma nova acomodação das respostas o que, todavia, não foi capaz de fazer a resposta ter o comportamento inicial. Na terceira curva nota-se que em torno dos

4,5 segundos a amplitude sofre uma pequena mudança, e esta alteração vai aumentando de intensidade até os 10 segundos, quando o algoritmo consegue restabelecer a situação de controle. Na quarta curva vê-se que as amplitudes mudam em torno dos 4,5 segundos, mas sem causar grandes variações nas oscilações, tanto que percebe-se uma tendência de acomodação durante o restante da simulação.

A Figura 4.18 mostra a resposta saudável da viga ao controle adaptativo mas comparada a resposta do modelo de referência.

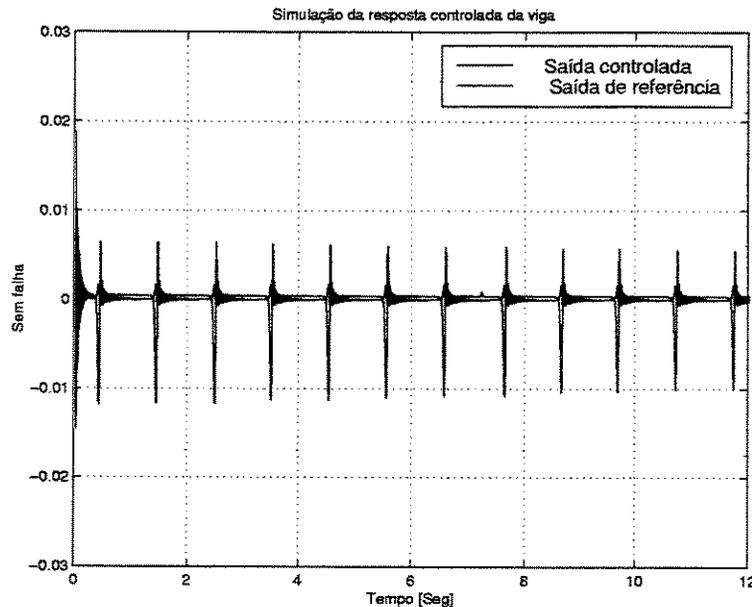


Figura 4.18: Resposta da viga ao controle adaptativo e do modelo de referência

Nota-se na Figura 4.18 que a resposta da viga seguiu satisfatoriamente a resposta do modelo de referência, onde as maiores diferenças são vistas nas amplitudes negativas do sobressinal.

4.2 Resultados Experimentais

Esta seção trata das medições experimentais obtidas na viga flexível. Os resultados referem-se à identificação e aos resultados dos controladores para variações de massa. Não foram realizadas medições para a viga com trinca.

4.2.1 Identificação

Os próximos parágrafos explicam a metodologia adotada para a identificação experimental da viga flexível. Um excitação pseudo-aleatória, conhecida por sinal de Schroeder, foi usada como perturbação, devido principalmente ao seu espectro plano na faixa de frequência de interesse e a queda retangular na frequência de corte. O sinal usado foi gerado com 4096 pontos na faixa de frequência de 0 – 500Hz. Assim para essa faixa de análise, o tempo de amostragem usado foi de $0.25ms$. A Figura 4.19 mostra o sinal de perturbação no domínio do tempo e a sua densidade espectral. Podem-se notar de fato suas excelentes características, conforme mencionado acima.

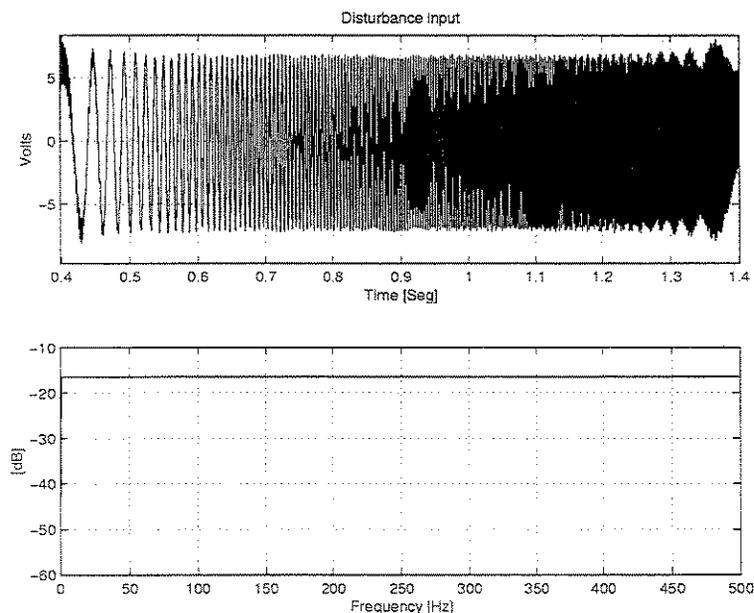


Figura 4.19: O sinal de Schroeder usado como entrada de perturbação

Esta perturbação foi aplicada à viga de onde mediu-se a resposta da planta e com as medições da entrada e da saída, foi calculada a respectiva FRF e coerência do sistema.

A Figura 4.20 mostra dois gráficos: o primeiro apresenta a coerência da medição enquanto o segundo mostra a amplitude da FRF em decibel, onde estes gráficos foram calculados para uma faixa de análise de 0 – 500Hz.

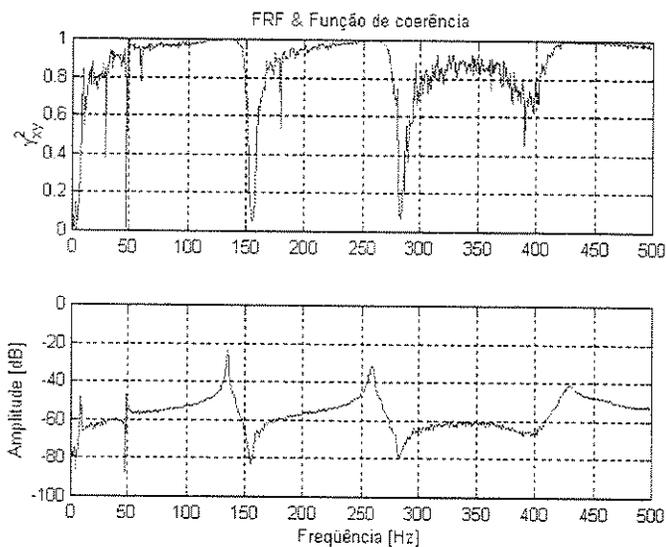


Figura 4.20: Identificação da viga flexível

Nota-se na Figura 4.20 que a curva que representa a coerência da medição possui a maior parte de suas amplitudes próximas do valor unitário. Dado as condições experimentais disponíveis, esta coerência caracteriza uma boa estimativa da FRF nas regiões próximas às frequências naturais. No segundo gráfico, que representa o módulo da FRF, notam-se cinco picos de frequências naturais e quatro anti-ressonâncias. Percebe-se que os picos estão com boa resolução e que pelo menos três deles coincidem com os valores unitários vistos na coerência. Além disso percebe-se que as zonas de maior ruído e de anti-ressonância correspondem aos valores mais baixos do gráfico da coerência.

Assim para validar as medições e a FRF calculada, simulou-se uma FRF teórica com a formulação apresentada. Para obter a FRF teórica realizou-se o cálculo dos fatores de amortecimento, onde estes valores calculados foram usados no modelo teórico. O cálculo dos fatores de amortecimento foi feito pelo método "Peak - Amplitude". Uma completa explanação do método pode ser achado em Ewins [30]. Na Figura 4.21 pode-se ver as FRFs teóricas e experimentais.

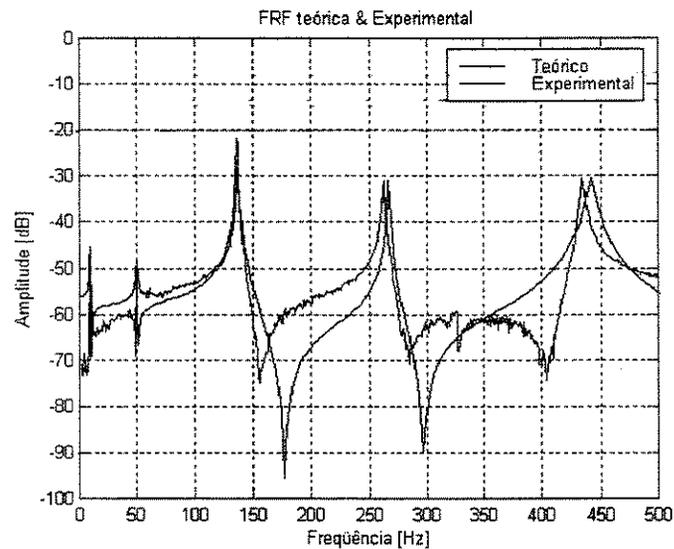


Figura 4.21: Comparação entre FRFs teóricas e experimentais

Teoricamente as frequências de uma equação característica são numericamente próximas das frequências naturais, caso o sistema seja pouco amortecido. Como esta viga apresenta a característica de ser pouco amortecida, adotou-se chamar as frequências de ressonância, da FRF experimental, de frequências naturais. Assim na Figura 4.21 nota-se que existe uma boa concordância entre as FRFs, onde os picos das frequências naturais amortecidas estão relativamente próximos às frequências naturais calculadas pelo método de elemento finito. No entanto nota-se que existe um erro razoável entre as anti-ressonâncias, onde os valores mostrados pela FRF teórica mostram-se com maiores vales. Além disso, nota-se que entre as frequências de 280 e 400 Hz é mostrada uma anti-ressonância experimental, o que já não acontece com a FRF teórica.

A tabela 4.2 mostra mais precisamente os valores das frequências naturais teóricas e experimentais.

Como visto na Figura 4.21, percebe-se uma boa concordância dos valores. Pela tabela vê-se que os erros estão aceitáveis, sendo o erro máximo de 1.39%.

Tabela 4.2: Comparação entre as frequências naturais da viga

<i>Validação das Frequências Naturais</i>			
Frequências (Hz)	Teórico	Experimental	Erro (%)
f_1	7.71	7.78	0.91
f_2	48.32	48.65	0.68
f_3	135.35	135.75	0.30
f_4	265.41	261.71	1.39
f_5	439.43	433.51	1.35

4.2.2 Medição da Viga sem Controle

Esta seção mostra as medições realizadas na viga flexível sem atuação e técnicas de controle. Durante a medição foi adicionada uma massa nas posições 1, 2, 3, de modo semelhante ao que foi feito nas simulações respectivas. A Figura 4.22 mostra as quatro medições das respostas, ao sinal de Schroeder, da viga no domínio do tempo. A seqüência das curvas também é a mesma usada na apresentação das simulações.

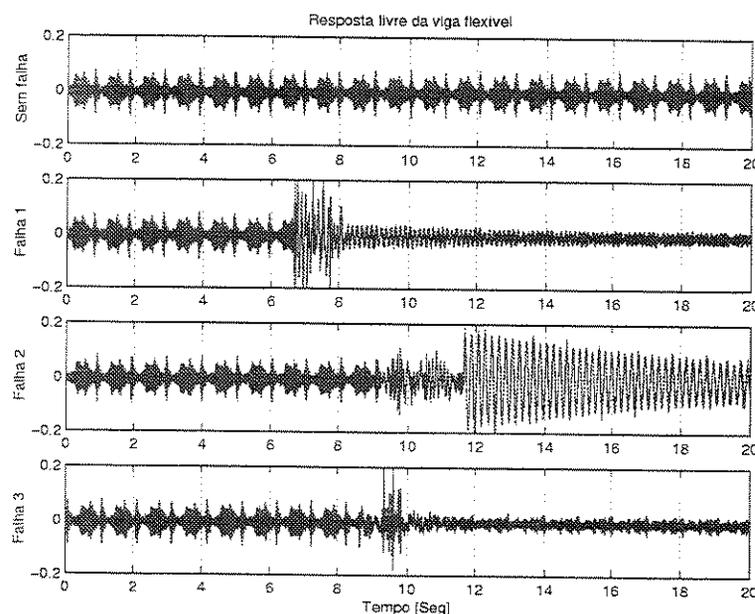


Figura 4.22: Resposta livre da viga flexível no domínio do tempo na faixa de 0-500Hz

Na Figura 4.22, a primeira curva representa o estado saudável da viga com

amplitudes em torno de 0.1 volts, onde seu comportamento permaneceu o mesmo durante todo os 20 segundos de medição. Na segunda curva vê-se que a resposta muda sensivelmente aproximadamente aos 7 segundos, quando a massa foi adicionada. Nota-se que a adição da massa nesta posição causa um forte transitório, onde as amplitudes chegam ao valor máximo da escala do gráfico, 0.2volts. O efeito do transitório desaparece após 1 segundo, notando-se que a resposta da viga passa a ser diferente da resposta sem adição de massa. A terceira curva mostra que as oscilações mudam em torno dos 9 segundos de medição. Nota-se que a massa causa um transitório e após isso vibra predominantemente com uma única freqüência chegando a amplitude perto de 0.2volts, que vai atenuando durante o restante da medição. Por causa disso, não é visto o comportamento da viga após atingir o equilíbrio. A quarta curva mostra a resposta da viga com a massa sendo adicionada na posição 3, onde esta adição ocorreu em torno dos 9 segundos. Nota-se que apesar de um transitório com amplitudes próximas ao limite da escala do gráfico, o seu efeito passa rapidamente, possibilitando a visualização do comportamento estável da viga.

A Figura 4.23 mostra a representação no domínio da freqüência das medições da Figura 4.22.

Na Figura 4.23 notam-se quatro espectros sendo $500Hz$ a freqüência máxima de análise. Na primeira curva nota-se que o espectro possui cinco picos de ressonâncias e quatro anti-ressonâncias. Percebe-se que o terceiro pico é o que possui maior amplitude, quando comparado aos demais picos. No segundo espectro percebem-se quatro freqüências naturais e três anti-ressonâncias. Além disso, ocorre uma pequena redução nos valores da primeira freqüência natural. O segundo modo passa a ser insignificante para o sistema e o terceiro modo apresenta poucas alterações mas a anti-ressonância que o segue sofre uma redução significativa, caindo abaixo de $150Hz$. O mesmo acontece com o quarto modo, onde não são vistas mudanças nas freqüências mas nota-se redução na anti-ressonância. Nota-se também que a quinta freqüência natural passa a possuir uma pico mais visível. No terceiro espectro notam-se quatro picos de ressonância e três freqüências de anti-ressonância. O primeiro pico mostra uma redução na sua freqüência, além de um aumento de sua amplitude. As mesmas mudanças do segundo a quinto modo vistas no espectro anterior são notadas

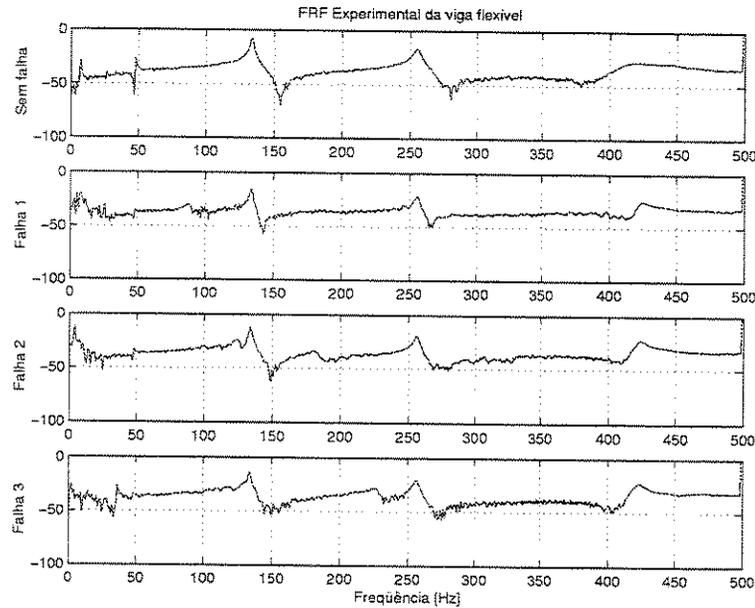


Figura 4.23: Resposta livre da viga flexível no domínio da frequência na faixa de 0-500Hz

neste espectro, onde estes diferenciam-se por pequenas variações nas amplitudes. No quarto espectro podem-se notar cinco frequências naturais e quatro anti-ressonâncias. Nota-se também que o nível de ruído aumentou, principalmente em baixa frequência. Percebe-se uma redução nas duas primeiras frequências naturais, o mesmo não acontecendo com as demais frequências naturais. Das três situações de falha, é nesta em que se nota uma menor variação nas amplitudes das respostas. Vê-se que a segunda natural ficou menor mas ainda existe.

A tabela 4.3 mostra uma comparação entre as frequências naturais. Dessa maneira pode-se ver com mais detalhe as variações que a massa causa nas frequências naturais.

No primeiro modo de vibração, a medida que a massa vai variando da posição 1 a 3, nota-se que a frequência natural sempre vai diminuindo. O mesmo não ocorre com o segundo modo, onde a massa na posição 2 mostra não haver nenhuma redução de frequência natural. Isto deve-se ao fato do peso da massa adicionada ser relativamente alto, e assim a medida que os modos vão aumentando a massa passa a se comportar com um apoio da viga, ou seja, um ponto de restrição. Os demais modos

Tabela 4.3: Frequências Naturais da Viga Flexível Com e Sem Massa

Modos	Sem Massa (Hz)	Posição 1 (Hz)	Posição 2 (Hz)	Posição 3 (Hz)
Primeiro	8	6,8	4,8	2
Segundo	48	25	48	36
Terceiro	134	133	133	133
Quarto	255	256	255	255
Quinto	420	422	421	420

não apresentam nenhuma variação ou, quando existe, tal variação é muito pequena.

A Figura 4.24 mostra a resposta da viga flexível no domínio do tempo, agora para excitação na faixa de 0 a 78Hz, o que corresponde a incluir o segundo modo de vibração.

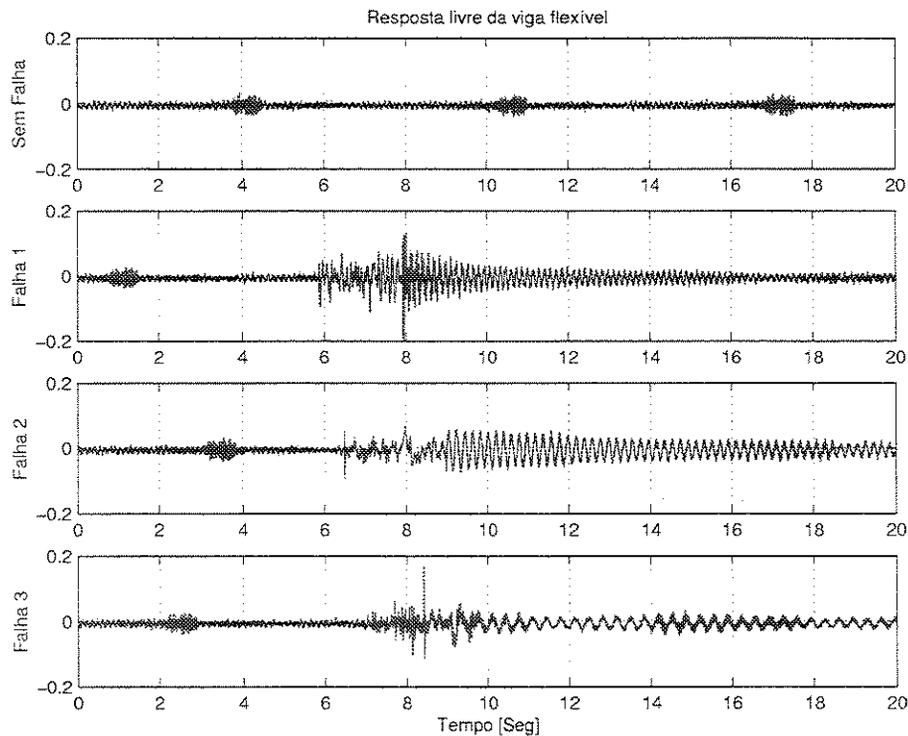


Figura 4.24: Resposta livre da viga flexível no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.24 a primeira curva representa o estado saudável da viga, apresentando amplitudes abaixo de 0.1 volts. Na segunda curva vê-se que a resposta muda sensivelmente com a adição de massa, aproximadamente em 6 segundos, passando a

ter maiores oscilações e de uma única frequência, após um período com múltiplas frequências de uns dois segundos. A partir de 8 segundos percebe-se uma oscilação com características de transitório, cuja amplitude decai até atingir um valor estável pequeno. A terceira curva mostra que as oscilações mudam em torno dos 7 segundos de medição. Novamente percebe-se que, antes do transitório, existem oscilações de múltiplas frequências que duram também um pouco mais de 2 segundos, assim é percebido o transitório a partir dos 9 segundos. Novamente o tempo de medição não foi suficiente para o desaparecimento do efeito do transitório, mas nota-se que a amplitude residual é maior do que no caso anterior e que a frequência é um pouco mais baixa. A quarta curva mostra um comportamento semelhante aos dois casos anteriores, resultando em uma amplitude aproximada ao segundo caso e com uma frequência ainda mais baixa.

A Figura 4.25 mostra os espectros calculados sobre as medições anteriores.

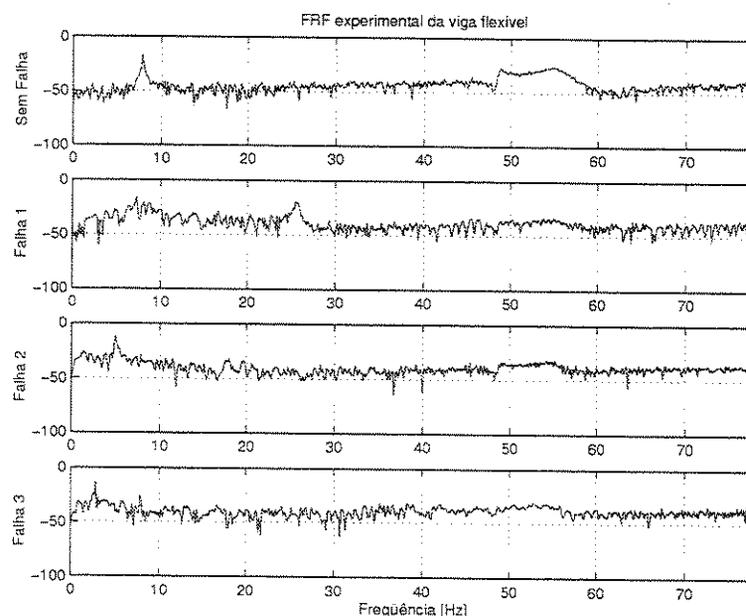


Figura 4.25: Resposta livre da viga flexível no domínio da frequência na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.25 percebem-se no primeiro espectro dois picos de ressonâncias e uma anti-ressonância, localizada antes da segunda frequência natural, como seria de

se esperar a partir da medição equivalente em $500Hz$. O segundo espectro mostra que o pico da primeira natural diminuiu um pouco, porém o nível de ruído é alto, como de resto em todas as demais curvas dessa figura. Observa-se ainda um segundo pico um pouco acima de $25Hz$. No terceiro espectro nota-se apenas um pico da primeira natural com uma frequência ainda menor. No quarto espectro podem-se notar dois picos abaixo de $10Hz$.

4.2.3 Medição Da Viga Com Controle Polinomial

Esta seção mostra os resultados experimentais do controle polinomial aplicado à viga flexível. A viga foi perturbada nas duas faixas de frequência, 0 a 78 e 0 a $500Hz$. Os parâmetros do controlador, polinômios R , S e T , foram projetados para executar o controle até $78Hz$ e $135Hz$, respectivamente. A forma de apresentação acompanha as figuras anteriores.

A Figura 4.26 mostra as respostas da viga flexível ao controle polinomial com e sem adição de massa, no domínio do tempo.

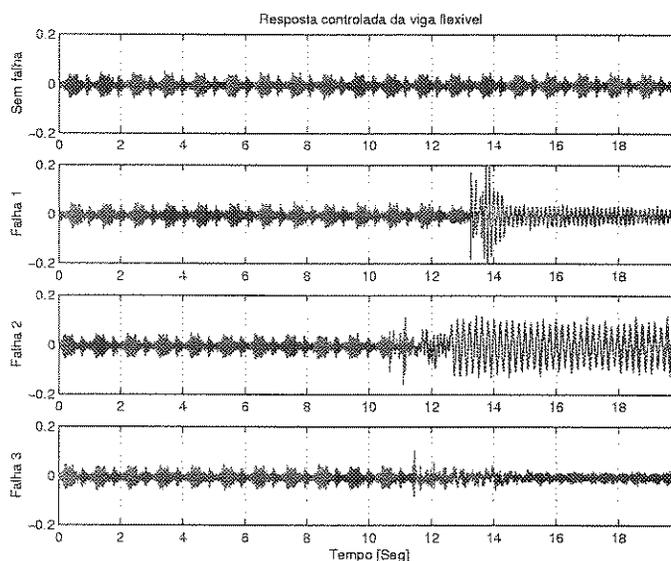


Figura 4.26: Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.26 a primeira curva representa o estado saudável e controlado da

viga flexível. Na primeira curva nota-se que a resposta permanece a mesma durante toda a medição. Na segunda curva, com a massa sendo adicionada na posição 1, percebe-se que em torno de 13 segundos o comportamento é semelhante ao caso sem controle, ou seja, ocorre inicialmente um período com várias frequências e depois entra em um transitório com predominância de uma única frequência, mas aqui ela é rapidamente atenuada. Nota-se que as amplitudes atingem o nível de $\pm 0,2$ volts. A terceira curva mostra a adição da massa em torno dos 11 segundos, mas só em 13 segundos percebe-se uma mudança significativa das amplitudes. Desde este instante até o fim da medição a viga mostra-se com amplitudes sem tendência de atenuação. A quarta curva mostra a resposta controlada da viga, com a massa sendo adicionada em torno dos 11 segundos, acarretando também um comportamento semelhante porém resultando em uma pequena amplitude residual.

As Figura 4.27 e 4.28 mostram a comparação entre as respostas livre e controlada da viga flexível.

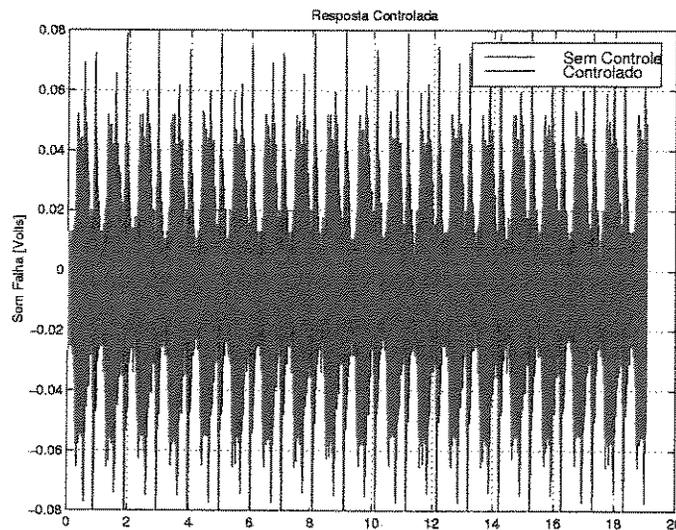


Figura 4.27: Comparação entre resposta com e sem controle polinomial na faixa de 0-500Hz, no domínio da frequência

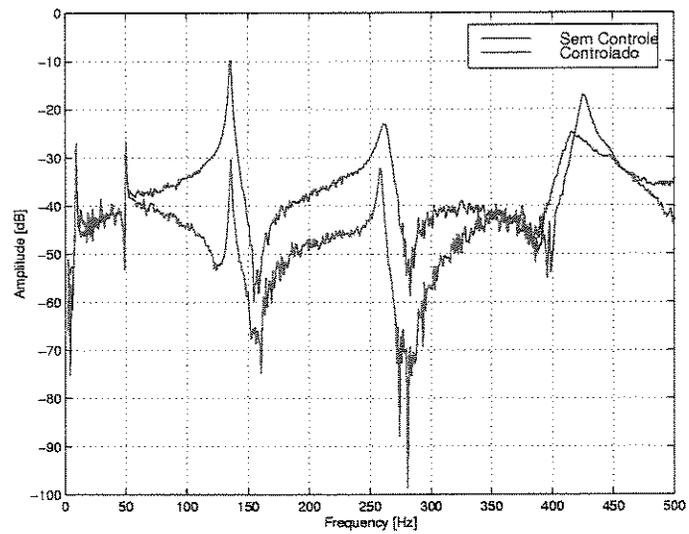


Figura 4.28: Comparação entre resposta com e sem controle polinomial na faixa de 0-500Hz, no domínio da frequência

Percebe-se pela Figura 4.27 que existe uma atenuação nas oscilações da viga flexível. A curva em vermelho representa a resposta controlada enquanto a curva azul mostra a resposta do sistema.

Pela Figura 4.28 pode-se ver mais claramente como cada modo foi afetado pelo controle. Nota-se que as duas primeiras frequências foram pouco atenuadas, todavia uma razoável atenuação é vista na terceira e quarta frequência. Nota-se ainda que a quinta frequência natural da resposta controlada possui uma amplitude maior que a amplitude da resposta da viga.

A tabela 4.4 mostra mais precisamente de quanto a resposta da viga flexível foi atenuada ou amplificada.

Tabela 4.4: Resultado do Controle polinomial

Modos	Variação das Amplitudes [dB]	Resultados
Primeiro	1,13	Redução
Segundo	2,44	Redução
Terceiro	20,47	Redução
Quarto	8,01	Redução
Quinto	9,48	Amplificação

Na tabela 4.4 nota-se que existe uma atenuação das oscilações até o quarto modo de vibração. Percebe-se que a máxima atenuação é de 20,47dBs, a qual ocorre no terceiro modo, que é o modo dominante do sistema. Entretanto no quinto modo existe uma amplificação da resposta em 9,48dBs.

A Figura 4.29 mostra os espectros calculados para as quatro medições apresentadas na Figura 4.26.

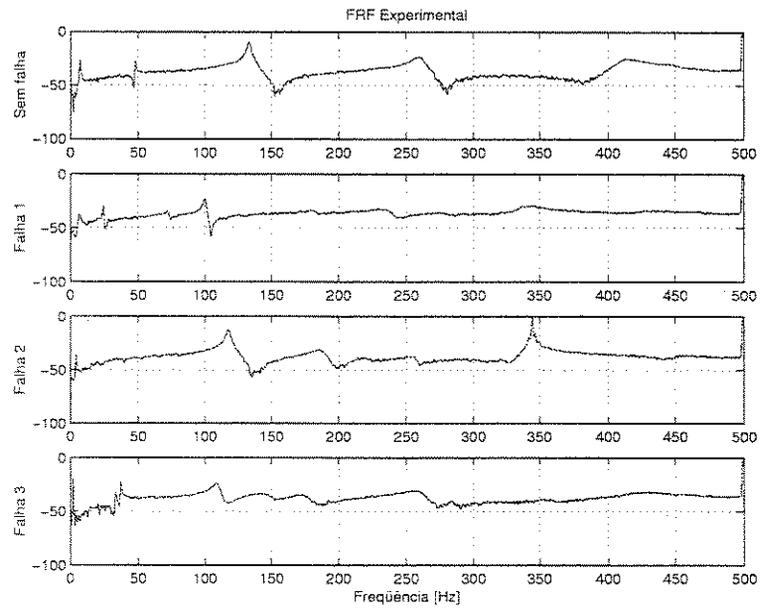


Figura 4.29: Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz no domínio da frequência

Nota-se na primeira curva da Figura 4.29 cinco picos de ressonância e quatro anti-ressonâncias. Todos os detalhes correspondem a observações já mencionadas anteriormente. Na segunda curva percebem-se quatro picos de ressonâncias e três anti-ressonâncias, onde na primeira, segunda, e terceira frequências nota-se uma redução do seu valor. Percebe-se ainda o aparecimento de um pequeno pico de ressonância entre 50 e 100Hz. Na terceira curva vêem-se quatro picos de ressonâncias e duas anti-ressonâncias. Percebe-se que a primeira frequência natural foi reduzida mais ainda. Nota-se que a segunda natural desapareceu e que a quarta frequência possui a maior amplitude. A quarta curva mostra quatro picos de ressonância e duas anti-ressonâncias. Nesta curva vê-se que a primeira frequência natural não sofreu amplificação, mas o valor da sua frequência foi a mais reduzida de todos os três casos de adição da massa. Percebe-se o aparecimento de um pico muito próximo ao segundo modo de vibração.

A Figura 4.30 mostra as respostas da viga, na faixa de 0 a 78Hz, ao controle polinomial no domínio do tempo.

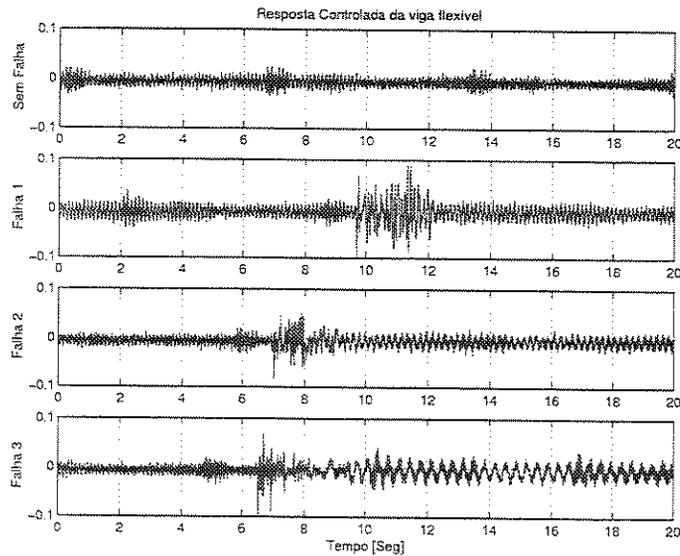


Figura 4.30: Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio do tempo

Na Figura 4.30, a primeira curva mostra a resposta com pequenas amplitudes. A segunda curva mostra a massa sendo adicionada em torno dos 10 segundos, onde nota-se o aparecimento de um transitório que leva as amplitude de oscilação para ± 0.1 volts. Vê-se ainda que após os 12 segundos a resposta controlada passa à um comportamento similar ao medido antes da adição da massa. Na terceira curva a massa é adicionada em torno dos 7 segundos, e neste momento registram-se mudanças nas amplitudes com características de um transitório. Por outro lado, após os 8 segundos este transitório já não existe mais e nota-se apenas a resposta da viga ao controle, que ao contrário da resposta à falha anterior é diferente à resposta de estado saudável. A quarta curva mostra a resposta ao controle da viga quando a massa é adicionada na posição 3. Neste caso o efeito do transitório não é tão acentuado quanto os anteriormente registrados mas nota-se que após a passagem deste efeito a resposta torna-se visivelmente diferente à resposta de estado norma da viga flexível.

A Figura 4.31 compara a resposta ao controle polinomial com a resposta da viga, no domínio do tempo e da frequência.

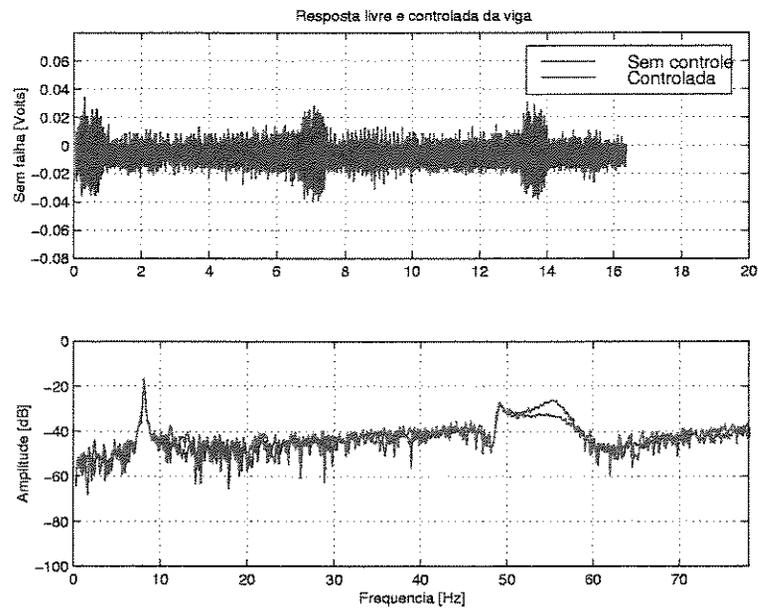


Figura 4.31: Comparação entre as respostas com e sem controle polinomial na faixa de 0-78Hz

A primeira curva da Figura 4.31 mostra as respostas sem e com controle, onde a curva vermelha representa a resposta controlada. Pode-se ver nesta figura que pequenas atenuações das oscilações ocorrem apenas nas regiões de ressonância. Percebe-se pelo segundo gráfico que não existe atenuação no primeiro modo, ficando os picos das frequências sobrepostos. Ainda neste gráfico nota-se que existe uma pequena redução no segundo modo.

Mostra-se na Figura 4.32 os espectros respectivos das respostas anteriores.

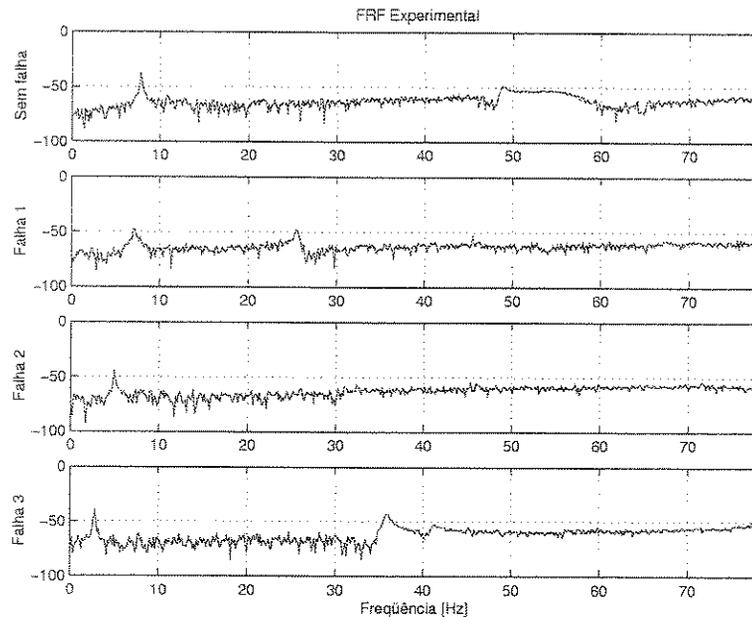


Figura 4.32: Resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-78Hz no domínio da frequência

No primeiro espectro da Figura 4.32 vêem-se dois picos de ressonâncias e uma anti-ressonância próxima à segunda frequência natural. No segundo espectro notam-se dois picos de ressonância e nenhuma anti-ressonância, onde vê-se uma pequena redução no valor da primeira natural e o aparecimento de um pico de ressonância próximo a 25Hz , indicando que não trata-se de segundo modo. No terceiro espectro vê-se apenas um pico de ressonância com seu valor menor que os casos anteriores e sem nenhuma amplificação no seu modo. Na quarta curva notam-se dois picos de ressonância e um terceiro de amplitude muito pequena, indicando que este

último trata-se da segunda natural e que o segundo pico é uma frequência nova.

4.2.4 Medição da Viga com Controle Adaptativo

O controle adaptativo autosintonizado foi realizado para a frequência máxima de $78Hz$, ou seja, a mesma faixa de análise usada para fazer um dos casos do controle polinomial. Por este motivo o controle adaptativo autosintonizado será comparado ao controle polinomial de mesma faixa de frequência. A Figura 4.33 mostra a resposta da viga ao controle adaptativo autosintonizado no domínio do tempo sem adição de massa. Ao contrário das figuras anteriores, apresenta-se apenas uma curva pois trata-se da resposta da viga de estado saudável.

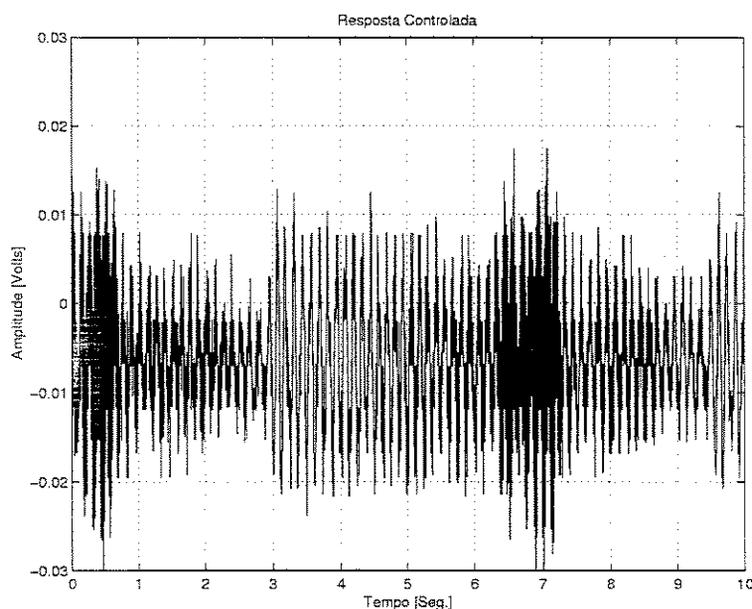


Figura 4.33: Resposta da viga com controle adaptativo no domínio do tempo, sem adição de massa, na faixa de 0-78Hz

Nota-se na figura uma escala mais adequada quando comparada à primeira curva da Figura 4.34. Vê-se que a máxima amplitude não ultrapassa os 0,02 volts positivos nem os 0,03 volts negativos, mostrando-se assim um certo nível "dc" na medida. Como trata-se da resposta da viga de estado saudável, nota-se em toda a medição que o comportamento periódico não é afetado.

A Figura 4.34 mostra as respostas ao controle adaptativo autosintonizado, para as mesmas condições de testes anteriores.

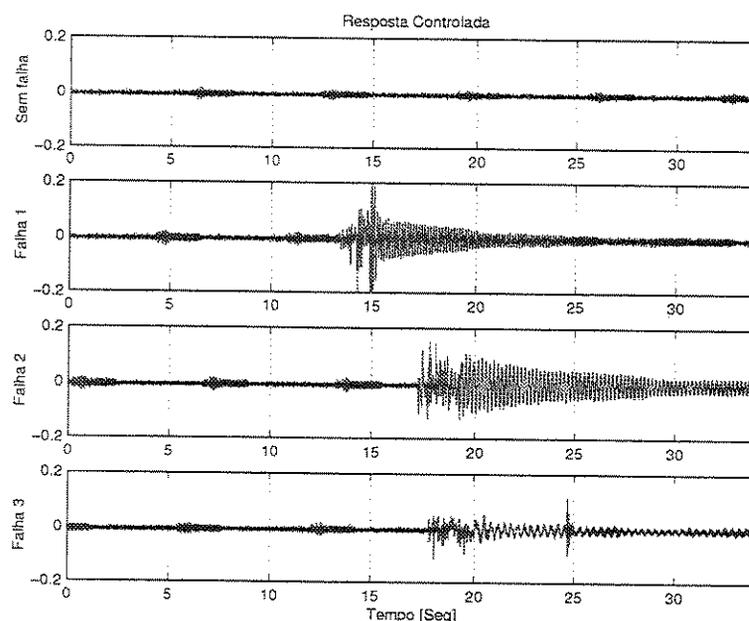


Figura 4.34: Resposta da viga com controle adaptativo no domínio do tempo na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.34 a primeira curva representa a resposta ao controle no domínio do tempo sem adição de massa. A segunda curva mostra que em torno dos 15 segundos ocorre uma mudança das amplitudes, a qual possui uma característica de transitório. Por outro lado, nota-se que este efeito desaparece ao final da medição. Na terceira curva percebe-se que esta massa é colocada em torno dos 18 segundos, e neste instante notam-se mudanças nas amplitudes de vibração. Esta variação mostra uma tendência de acomodação, mas devido à escala de tempo usada não foi possível ver qual o novo comportamento da viga. Na quarta curva vê-se que em torno dos 18 segundos ocorrem mudanças nas oscilações devido a uma adição de massa. Percebe-se que o efeito da adição da massa causa uma redução nas amplitudes, onde este comportamento permanece por todo período da medição.

A Figura 4.35 mostra a resposta do controle adaptativo no domínio da frequência.

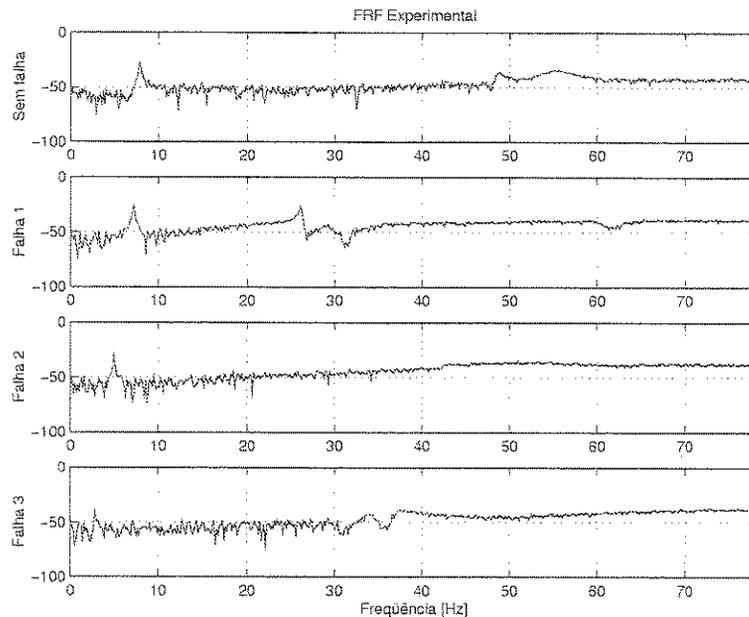


Figura 4.35: Resposta da viga ao controle adaptativo no domínio da frequência na faixa de 0-78Hz

Na Figura 4.35, vê-se no primeiro espectro dois picos de ressonâncias e nenhuma anti-ressonância. Além disso vê-se que durante toda a faixa de análise as amplitudes ficam em torno dos $-50dB$, saindo desses valores apenas nos valores de ressonância. No segundo espectro percebem-se dois picos de ressonância e nenhuma anti-ressonância. Comparando-se com a primeira frequência natural do espectro anterior nota-se que esta frequência foi reduzida. Além disso seria possível dizer o mesmo do segundo pico mas acredita-se que trata-se de um novo modo e não da redução da segunda frequência natural da viga. No terceiro espectro vê-se apenas um pico de ressonância e nenhuma anti-ressonância. Novamente percebe-se uma redução na primeira frequência natural, sendo que esta foi mais acentuada que na falha 1. No quarto espectro a visualização das frequências naturais ficou prejudicada devido ao nível de ruído, mas a primeira natural foi reduzida com a maior de todas as intensidades e que a segunda natural não foi excitada.

Para observar a eficácia do controle adaptativo, mostra-se na Figura 4.36 as respostas livre e controladas pelos métodos adaptativo e polinomial, no domínio

da frequência.

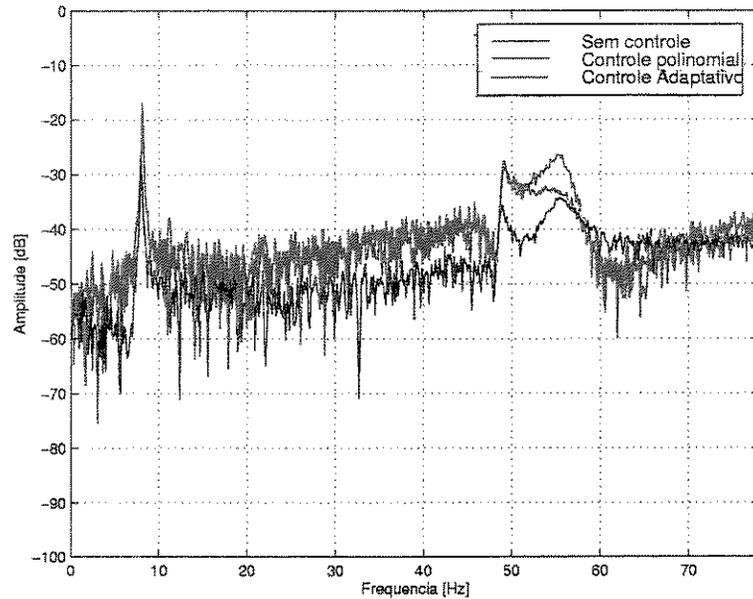


Figura 4.36: Comparação entre as respostas, controle polinomial e adaptativo

Na Figura 4.36 vê-se três espectros relacionados às respostas livre, ao controle polinomial e ao controle adaptativo da viga flexível. Nos três espectros notam-se duas frequências naturais e nenhum vale de anti-ressonância. Percebe-se que na primeira frequência natural o efeito do controle polinomial é desprezível enquanto o controle adaptativo comportou-se satisfatoriamente. Na segunda frequência natural, percebe-se um melhor desempenho do controle polinomial, mas o controle adaptativo mostrou-se novamente com uma melhor capacidade na atenuação das amplitudes. Para mostrar mais detalhadamente o efeito do controle adaptativo autosintonizado, mostra-se na tabela 4.5 as atenuações realizadas por cada controlador.

Tabela 4.5: Tabela comparativa entre os controles polinomial e adaptativo

Frequência Natural	Controle Adaptativo	Controle Polinomial	Efeito [dB]
Primeira	9,69	0	Atenuação
Segunda	7,72	2,32	Atenuação

Observando a tabela 4.5 confirma-se o que foi visto na Figura 4.36. As atenuações realizadas pelo controle adaptativo autosintonizado foram mais eficazes

que o controle polinomial. Vê-se que na primeira frequência natural a atenuação realizada pelo controle polinomial é inexistente, o que não ocorre com o controle adaptativo. Na segunda frequência natural percebe-se uma redução das amplitudes devido ao controle polinomial mas, como pode-se ver na tabela, a atenuação do controle adaptativo foi novamente mais acentuada.

4.3 Análise dos Resultados

Esta seção fará uma análise dos resultados simulados e experimentais mostrados neste capítulo. O objetivo do estudo foi obter dados confiáveis para a realização da detecção de falha na viga flexível.

Como visto neste capítulo uma parte dos resultados obtidos foram em relação à resposta da viga flexível sem atuação de controladores e que, por comodidade, convencionou-se chamar de respostas da viga. O estudo foi feito com base em respostas simuladas e experimentais, assim a análise será feita por uma comparação entre as respostas.

Antes de relacionar os resultados simulados com os experimentais, deve-se lembrar que o estudo à detecção de trincas na viga foi apenas simulado. Assim uma comparação com dados experimentais não é possível. Entretanto pode-se dizer que as simulações mostraram-se coerentes com a realidade, uma vez que o aparecimento de uma trinca causou um aumento das amplitudes de oscilação previamente controladas. A coerência existe no fato que uma trinca causa uma diminuição na rigidez do sistema e conseqüentemente um aumento na flexibilidade, o que em outras palavras pode causar um aumento na vibração do sistema. Além disso, como o sistema estava submetido a um algoritmo de controle adaptativo, a vibração mostrou-se com tendências de atenuações, uma vez que após um certo tempo suas amplitudes mostraram-se menores.

Com relação às respostas da viga sem atuação de controladores, pode-se ver uma boa concordância entre os resultados simulados e experimentais. As amplitudes estão próximas, ambas possuem amplitudes máximas de 0.15 mVolts e as suas frequências de oscilações foram validadas pela comparação entre as FRFs teóricas e

experimentais. Assim pode-se dizer que a viga está bem representada teoricamente. Quando a este modelo e à planta é adicionado massas nas três posições definidas, as respostas simuladas e experimentais mostram-se com diferenças de amplitudes. A amplitude máxima simulada é de $5Volts$ enquanto a medida foi de $0.2Volts$. Esta significativa diferença justifica-se no fato dos sensores e atuadores, PZTs, não terem sido calibrados, ou seja, o sinal que foi medido correspondia a unidade de voltagem e não de deformação. Por isso os resultados foram qualitativamente equivalentes, tanto no domínio do tempo quanto da frequência. O mesmo resultado foi encontrado quando a análise foi realizada para uma faixa de frequência mais baixa, $78Hz$, onde neste caso notou-se que o nível de ruído aumentou mais ainda. Assim conclui-se que sem atuação de controle os sinais estão satisfatórios para aplicação do método de detecção de falha.

Os resultados referentes aos controladores mostraram que os controles funcionaram muito melhor no caso simulado, sendo as atenuações mais eficazes que as experimentais. Em ambos casos a adição de massa causou mudanças significativas no sistema, tornando os sinais de boa qualidade para detecção de falha, já que as mudanças nas amplitudes são suficientes para caracterizar um sistema com falha. Desta maneira conclui-se que as respostas controladas estão adequadas para que a detecção da variação de massa seja realizada. Comparando-se os resultados controlados com os não controlados, vê-se que o controle causa uma pequena diferença entre as respostas. As mudanças vistas foram de duas formas, primeiro o controle tende a atenuar as amplitudes mais rapidamente e segundo a massa adicionada na posição 2 mostrou causar um grande aumento de amplitudes nos resultados simulados para o controle adaptativo e para o controle polinomial experimental. Como este comportamento foi visto para tipos de controles diferentes e faixa de frequências diferentes, acredita-se que esta posição seja um local de difícil controle para a configuração usada. A única maneira de confirmação seria com maiores experimentos e melhores instrumentações.

Assim de uma maneira geral a conclusão é que os sinais estão satisfatórios para aplicação dos métodos de detecção de falha, tendo em vista que tanto para os resultados simulados quanto para os experimentais as respostas variaram satisfatoriamente.

Capítulo 5

ANÁLISE DOS DETECTORES DE FALHAS UTILIZADOS

Este capítulo mostra os resultados para detecção de falha usando o método de observador de saída e neural. Depois de mostrados os resultados é feita uma análise comparativa entre os resultados do observador de saída e do observador neural.

5.1 Detecção de Falhas Por Observador de Saída

Esta seção analisa os resultados das detecções de falha realizadas com o observador de saída. A análise realizada será feita com base nos resultados simulados e experimentais da viga flexível, sendo os resultados para falhas aplicadas à viga sem controle e com controladores adaptativo autosintonizado e polinomial.

5.1.1 Resultados Simulados

As simulações de detecção de falha usando o método de observadores robustos foram aplicadas a uma viga flexível que teve dois tipo de falhas, trinca e variação de massa. A trinca foi simulada para a viga submetida ao controle adaptativo autosintonizado, mas a variação de massa foi simulada para a viga submetida ao controle polinomial e adaptativo autosintonizado. O motivo para estas aplicações foi baseado

nas condições experimentais.

Viga sem controle

A figura 5.1 mostra a simulação da detecção da variação de massa para resposta não controlada (novamente adota-se chamar resposta não controlada por resposta) da viga, na faixa de 0 – 500Hz.

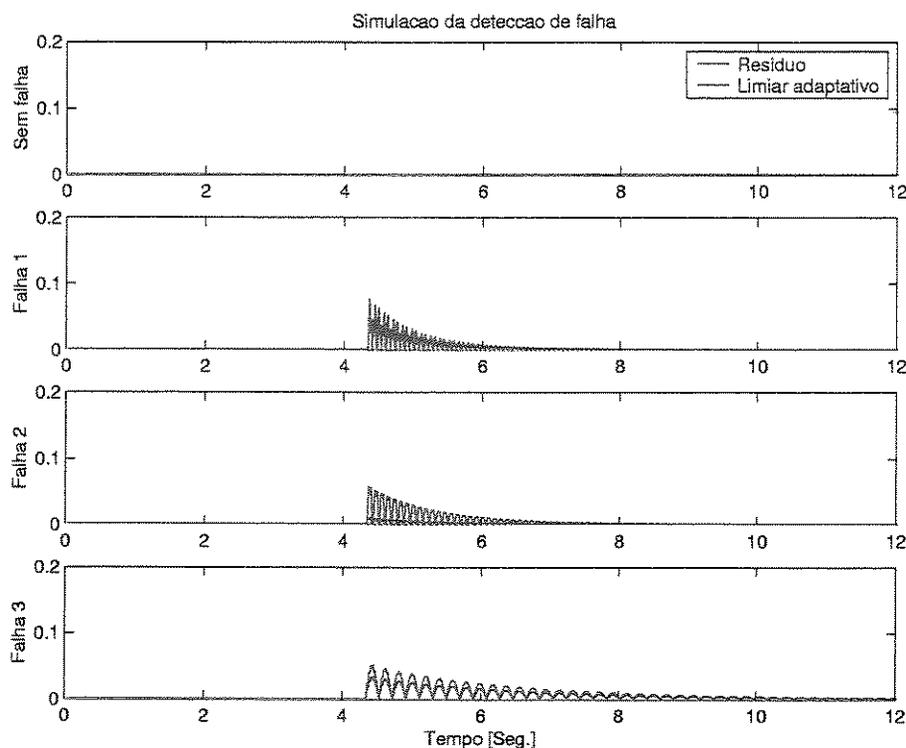


Figura 5.1: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz

Nota-se pela figura 5.1 que a primeira representa o resíduo e o limiar para a viga sem falha, a segunda representa a viga com a falha 1, a terceira com a falha 2 e a quarta com a falha 3. Nota-se que na primeira curva, o resíduo não ultrapassa o limiar. Na curva 2 percebe-se que o resíduo passa o limiar aproximadamente aos 5 segundos, entretanto o resíduo volta a um patamar abaixo do limiar após um certo tempo. Na terceira curva percebe-se que o resíduo não passa o limiar durante todo tempo da simulação. A quarta curva mostra que o resíduo passa o limiar mas com a menor de todas as intensidades. Estes resultados mostram que a falha mais evidenciada foi

a falha 2, uma vez que as amplitudes do resíduo foram as maiores entre as falhas simuladas. Como visto no capítulo 4, a massa adicionada na posição 2 indicou ser uma posição onde ocorrem fortes perturbações.

A figura 5.1 mostra a simulação da detecção da variação de massa para a resposta livre da viga, na faixa de $0 - 78Hz$.

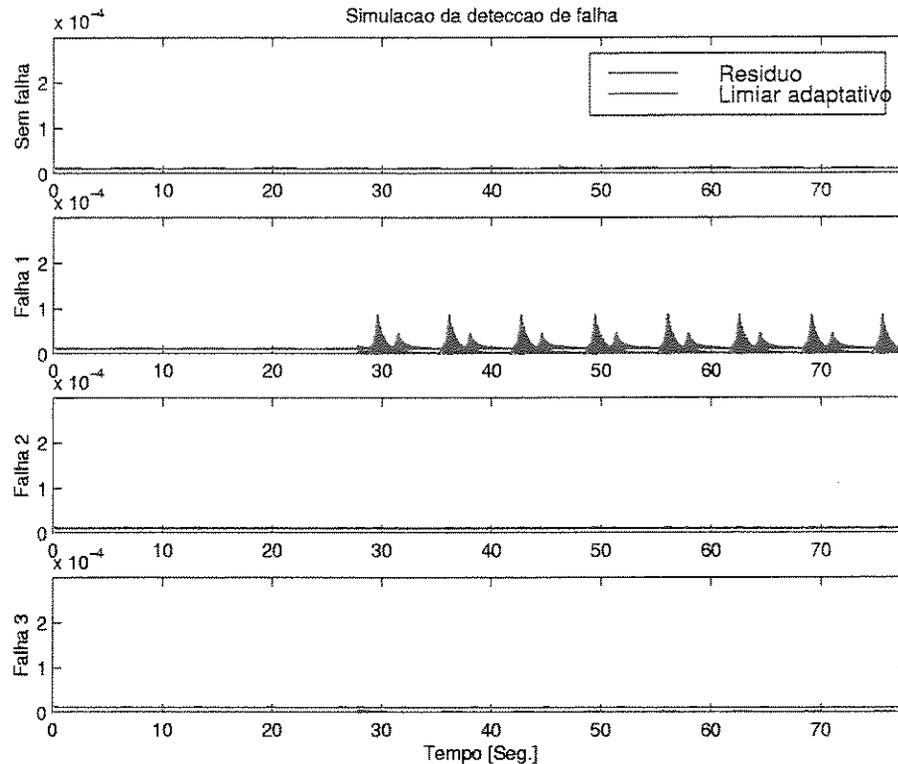


Figura 5.2: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz

Na figura 5.2 vê-se que na primeira curva, o resíduo não ultrapassa o limiar durante todo o tempo da simulação. Na curva 2 percebe-se que o resíduo passa o limiar aproximadamente aos 30 segundos. Ao contrário dos resultados encontrados anteriormente, o resíduo não volta a um patamar abaixo do limiar. Na terceira curva o resíduo não passa o limiar em nenhum momento, mas percebe-se pequenas mudanças nas amplitudes do limiar. A quarta curva mostra que o resíduo também não ultrapassou o limiar. Estes resultados mostram que a falha mais evidenciada foi a falha 1, uma vez que as amplitudes do resíduo foram as maiores entre as falhas

simuladas e a única que de fato foi detectada.

Viga com controle polinomial

A figura 5.3 mostra a detecção de falha simulada para a viga com controle polinomial na faixa de $0 - 500Hz$.

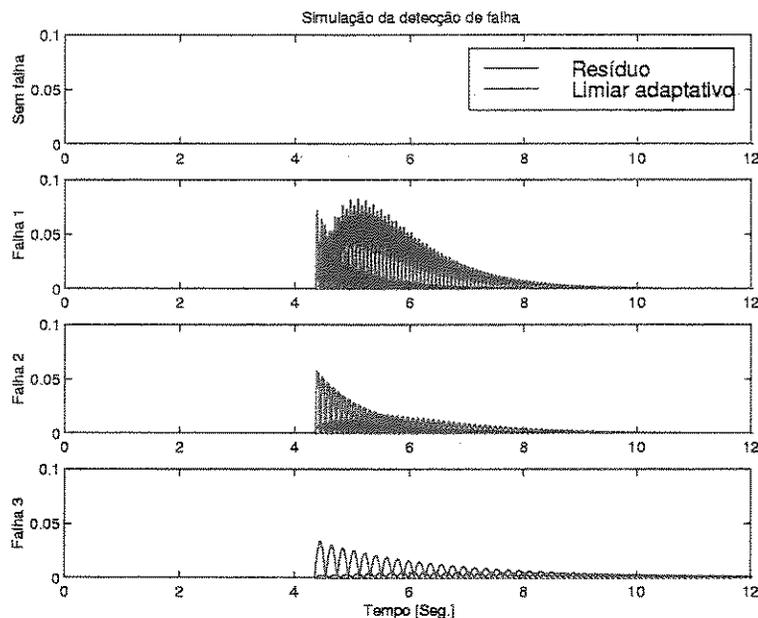


Figura 5.3: Simulação da detecção de falha na faixa de $0-500Hz$

Pela figura 5.3 nota-se que nem todas as falhas foram detectadas, uma vez que o resíduo na falha 3 não passa o limiar, mesmo notando que há uma mudança das suas amplitudes. Além disso nota-se que a intensidade do alarme, ou seja, quanto o resíduo passa o limiar, vai diminuindo a partir da falha 1. A figura 5.4 mostra a detecção de falha simulada para a viga com controle polinomial na faixa de $0 - 78Hz$.

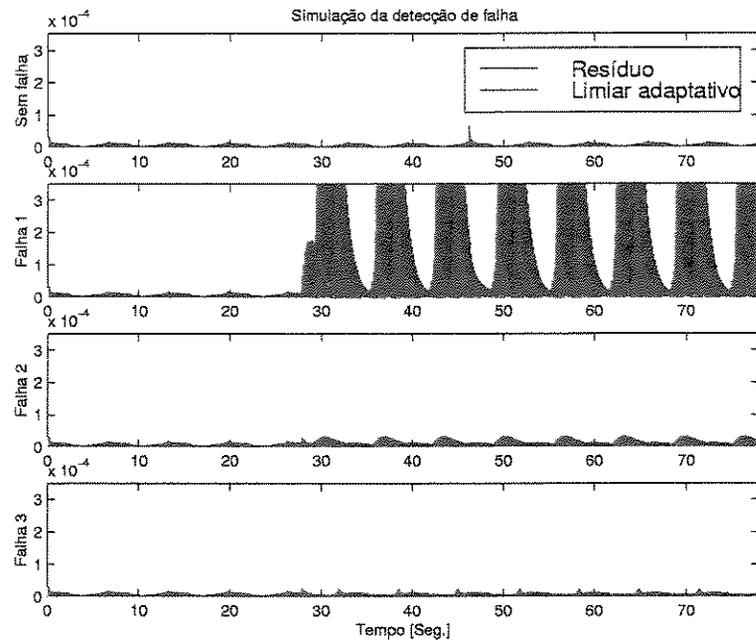


Figura 5.4: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz

Novamente, a figura 5.4 mostra que nem todas as falhas foram alarmadas. O resíduo na falha 3, mais uma vez, não passa o limiar, mesmo notando-se que há uma mudança das suas amplitudes. Além disso, nota-se que a intensidade do alarme vai diminuindo a partir da falha 1. Percebe-se que a massa adicionada na posição 3 causa poucas modificações no ponto onde está sendo monitorada.

Viga com controle adaptativo

A detecção de falha para a viga controlada pelo método autosintonizado foi realizada em duas situações distintas. Primeiro o método de observador de saída foi aplicado à uma viga controlada por um sinal de onda quadrada e neste sistema realizou-se a simulação de uma trinca, conforme apresentado no capítulo 4. A segunda detecção de falha foi realizada em uma viga controlada, onde a perturbação era uma entrada pseudo-aleatório conhecido por *senal de Schroeder*.

A figura 5.5 mostra a detecção de falha realizada em uma viga controlada mas com o aparecimento de uma trinca.

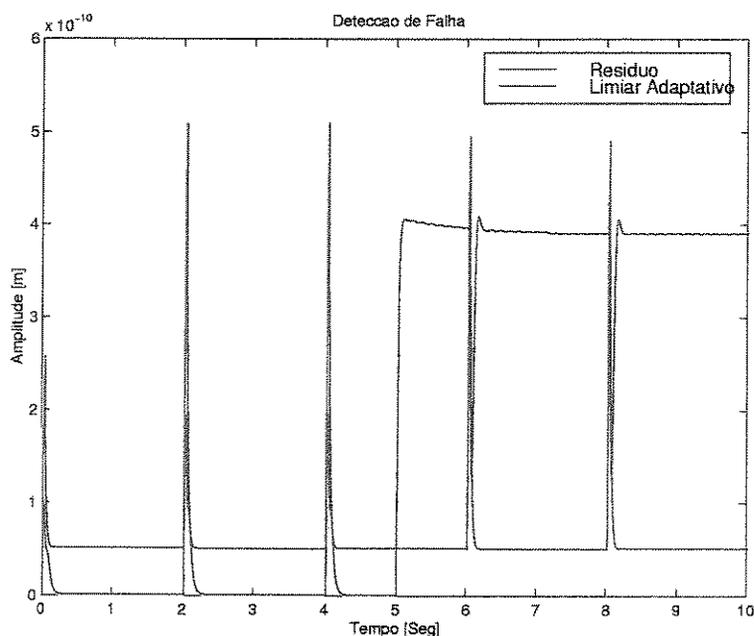


Figura 5.5: Simulação da detecção de trinca na viga

Nota-se que a trinca aparece aos 5 segundos, mesmo instante em que o resíduo passa o patamar do limiar adaptativo. Percebe-se que o resíduo permanece acima do limiar durante todo o restante de tempo da simulação e ainda não mostra nenhuma tendência de voltar aos valores inferiores do limiar. Esse resultado indica que desde o aparecimento da trinca, aos 5 segundos, até o final da simulação, aos 10 segundos, o sistema permanece em estado de alarme. Os resultados do controle mostraram que existiu uma tendência de controle das vibrações, mas essa tendência não foi traduzida em uma queda do resíduo.

A figura 5.6 mostra a detecção de falha realizada na viga mas para variação de massa em três posições diferente de adição da massa.

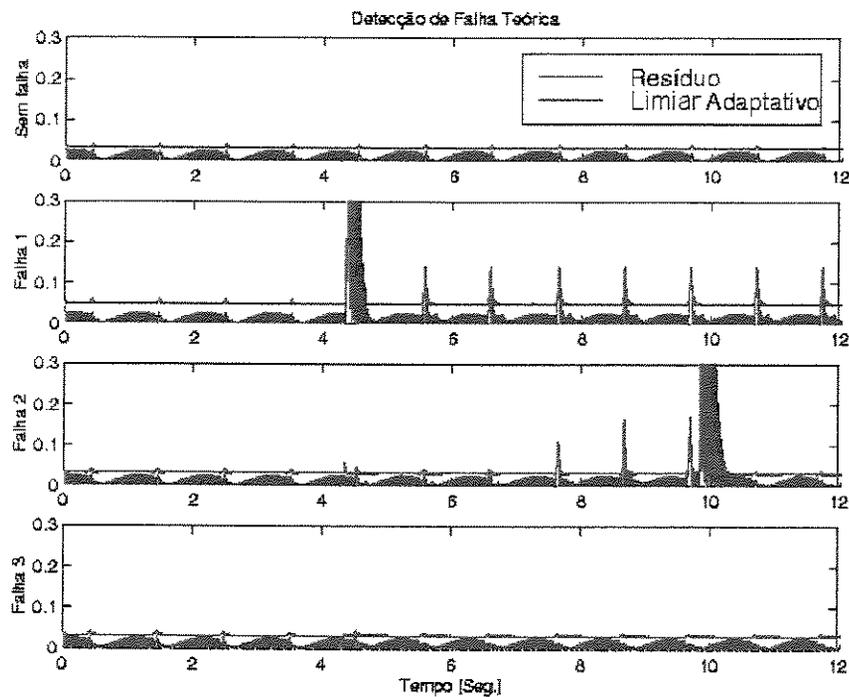


Figura 5.6: Simulação da detecção da variação de massa na viga

Na figura 5.6 mostra-se quatro curvas representando os tipos de variação de massa. Na figura 1 nota-se que o resíduo permanece abaixo do limiar durante todo o tempo da simulação, mostrando que nenhuma falha ocorreu. Na curva 2 nota-se que próximo aos 5 segundos a massa é adicionada e nesse momento as amplitudes do

resíduo passam o limiar. Percebe-se também que o resíduo continua ultrapassando o limiar durante todo o restante da simulação. A curva 3 mostra que a falha começou a ser alarmada perto dos 8 segundos. Entretanto sabe-se que a massa foi adicionada em 5 segundos. Isto mostra uma dificuldade maior em obter-se respostas controladas, ou seja, a falha nesta posição causa uma instabilidade no sistema até os 10 segundos uma vez que o controle conseguiu realizar novamente as atenuações das amplitudes após esse instante. Este resultado de controle pode ser visto no capítulo 4 na seção de resultados simulados. A curva 4 não mostra nenhuma alteração das amplitudes dos resíduos, que permanecem abaixo do limiar durante todo tempo da simulação. Neste caso, a massa adicionada não foi capaz de alterar o comportamento da viga.

5.1.2 Resultados Experimentais

A apresentação dos resultados experimentais seguirá a mesma seqüência dos resultados simulados, onde as falhas serão iguais às simuladas, com exceção da trinca que não foram implementadas. Os resultados experimentais são para a variação de massa.

Viga sem controle

A figura 5.7 mostra a detecção de falha experimental realizada nas respostas da viga flexível na faixa de $0 - 500Hz$.

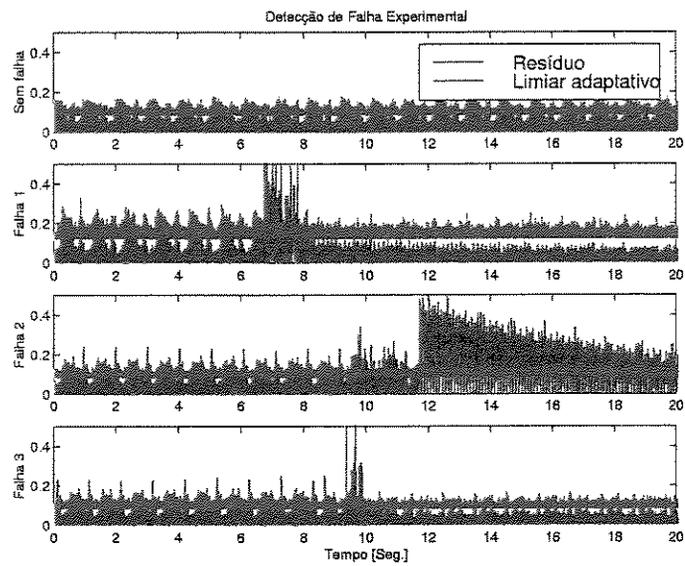


Figura 5.7: Detecção experimental de falha, para viga sem controle, na faixa de 0-500Hz

A linha vermelha representa o limiar adaptativo e a linha azul o resíduo gerado pelo método. Como é notado o alarme é disparado, ou seja, o resíduo fica acima do limiar, somente nos casos da ocorrência da falha. Entretanto estes alarmes são realizados de maneiras diferentes. Nota-se pela figura que a falha 2 permanece por mais tempo em estado de alarme, enquanto nas falhas 1 e 3 o sistema deixa de detectar a variação de massa após um curto intervalo de tempo.

Na figura 5.8 é mostrada a detecção de falhas experimental para as respostas na faixa de $0 - 78Hz$.

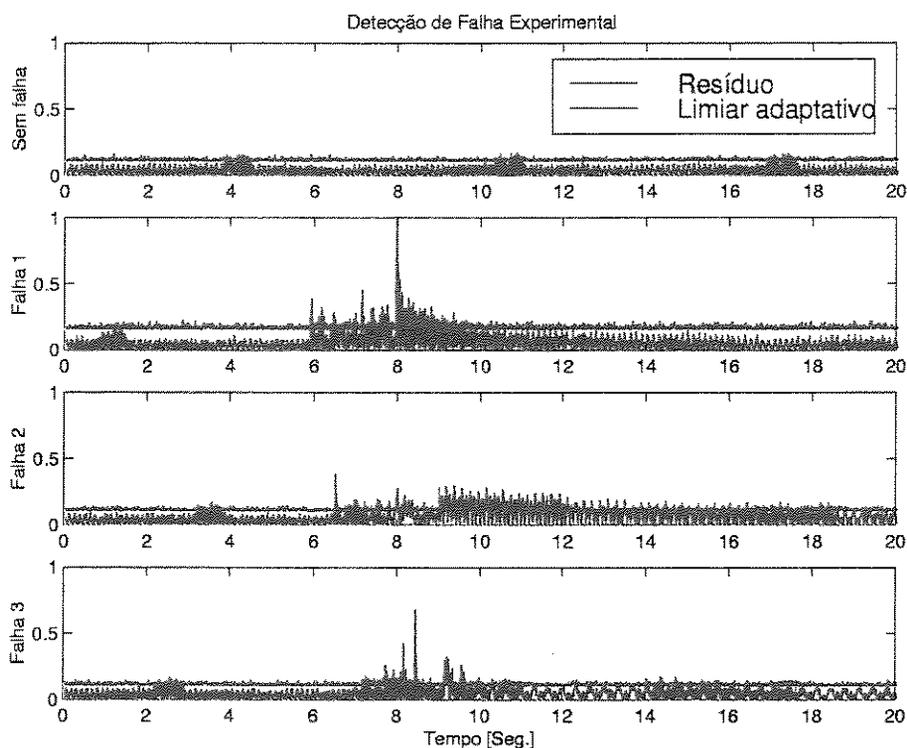


Figura 5.8: Detecção experimental de falha, para viga sem controle, na faixa de $0-78Hz$

Novamente a falha 2 foi alarmada durante um maior tempo. Entretanto a severidade do alarme foi menor que as severidades das detecções realizadas na faixa de $0 - 500Hz$.

Viga com controle polinomial

A figura 5.9 mostra a detecção de falha experimental.

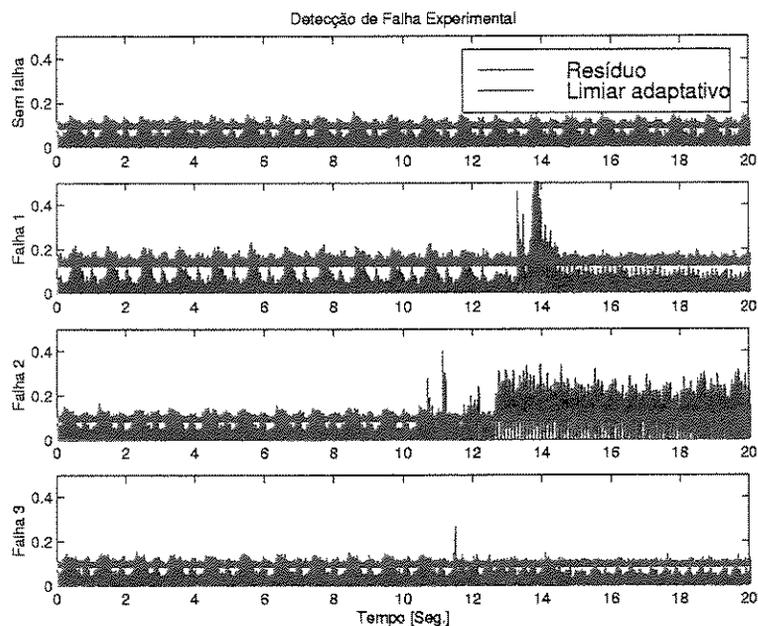


Figura 5.9: Detecção experimental de falha, para viga com controle polinomial, na faixa de 0-500Hz

Analisando a figura 5.9 vê-se que os alarmes foram disparados com a adição da massa. Todavia, o tempo em que o sistema permaneceu em estado de alarme foi diferente para cada falha. A falha 2 mostra-se com o resíduo acima do limiar durante todo o restante da medição. Além disso a falha 2 não mostra uma tendência de queda deste resíduo, o que caracterizaria um sistema sem falha. Assim, acredita-se que este alarme visto na falha 2 tenha sido gerado, além da adição da massa, por uma instabilidade do controlador, que nesta posição não teve a capacidade de atenuar as vibrações para uma viga tendo uma massa na posição 2.

A figura 5.10 mostra a detecção de falha experimental para a viga com controle polinomial na faixa de 0 – 78Hz.

Analisando a figura 5.10 vê-se que os alarmes não foram disparados com tanta clareza. Os resíduos ultrapassam muito pouco os limiares e permanecem neste estado durante um curto intervalo de tempo. Com base neste dados, diz-se que a

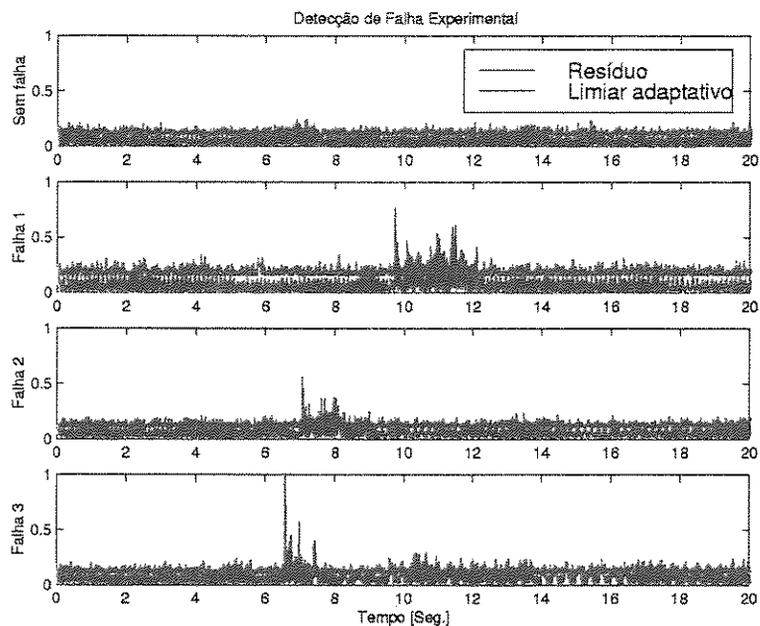


Figura 5.10: Detecção experimental de falha, para viga com controle polinomial, na faixa de 0-78Hz

confiabilidade da detecção foi afetada pela qualidade do sinal. As medições para esta faixa de frequência mostraram que o nível de sinal é baixo, onde o nível de ruído é aumentado no momento da adição da massa.

Viga com controle adaptativo

Uma detecção de falha experimental foi realizada na mesma faixa de frequência mas usando um controle adaptativo autosintonizado. Estes resultados podem ser visto na figura 5.11.

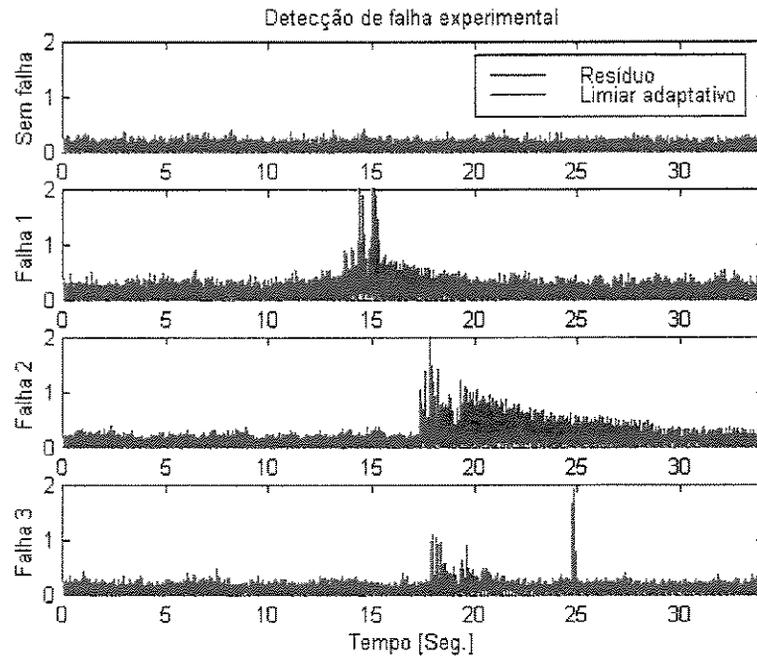


Figura 5.11: Detecção experimental de falha, para viga com controle adaptativo, na faixa de 0-78Hz

Na figura 5.11 consegue-se ver uma detecção de melhor qualidade, onde os resíduos passam um pouco mais o limiar. Nota-se que o maior tempo de alarme é visto na falha 2 mas, ao contrário da detecção de falha na viga com controle polinomial na faixa de $0 - 500Hz$, nesta curva vê-se que o resíduo volta a ficar abaixo do limiar, representando um sistema sem falha. Assim, pode-se dizer que além do nível de sinal, o tipo de controle aplicado à viga pode afetar a qualidade das detecções de falha.

5.2 Detecção de Falhas por Redes Neurais

Esta seção analisa os resultados das detecções de falha realizadas com o observador de saída neural. A análise realizada será feita com base nos resultados simulados e experimentais da viga flexível, sendo os resultados para falhas aplicadas à viga sem controle e com controladores adaptativo autosintonizado e polinomial.

5.2.1 Resultados Simulados

Esta estrutura de apresentação seguirá a mesma forma de apresentação dos resultados simulados referentes ao método de observador de saída.

Viga sem controle

A figura 5.12 mostra a detecção de falha realizada na viga flexível sem atuação de controle.

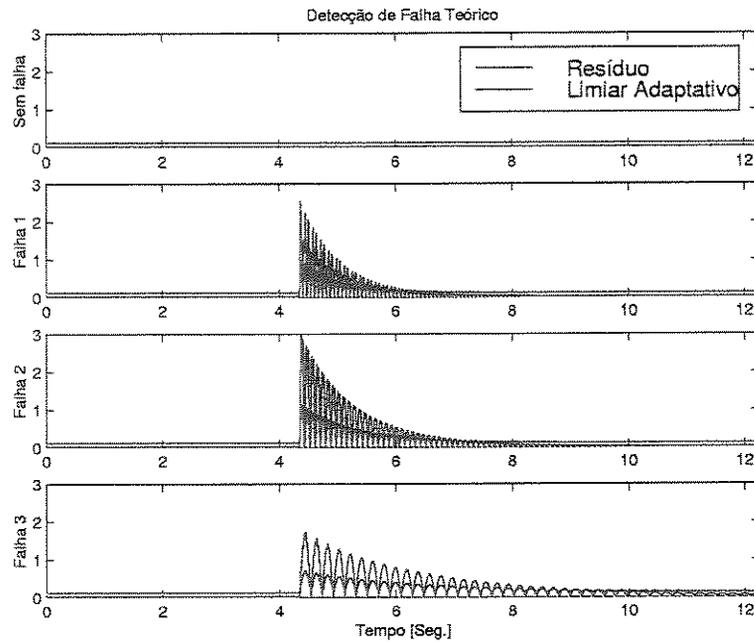


Figura 5.12: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais

Pela figura 5.12 nota-se que na primeira curva o resíduo não ultrapassa em momento algum o limiar, mostrando assim que a viga não possui falhas. Na curva 2 vê-se que perto de 5 segundos o resíduo passa o limiar mas após 3 segundos sua amplitude volta a ficar abaixo do limiar. O mesmo é visto na curva 3, mas com a diferença que o resíduo passa ainda mais o limiar, ou seja, nesta posição a massa causou uma variação mais forte na planta. A curva 4 mostra que o resíduo passa o limiar perto dos 5 segundos mas com a menor intensidade entre todos os defeitos. Assim a massa colocada na posição 3 causa a menor perturbação na viga, para a viga sem atuação sem controle.

A figura 5.13 realiza o mesmo estudo para uma faixa menor de frequências.

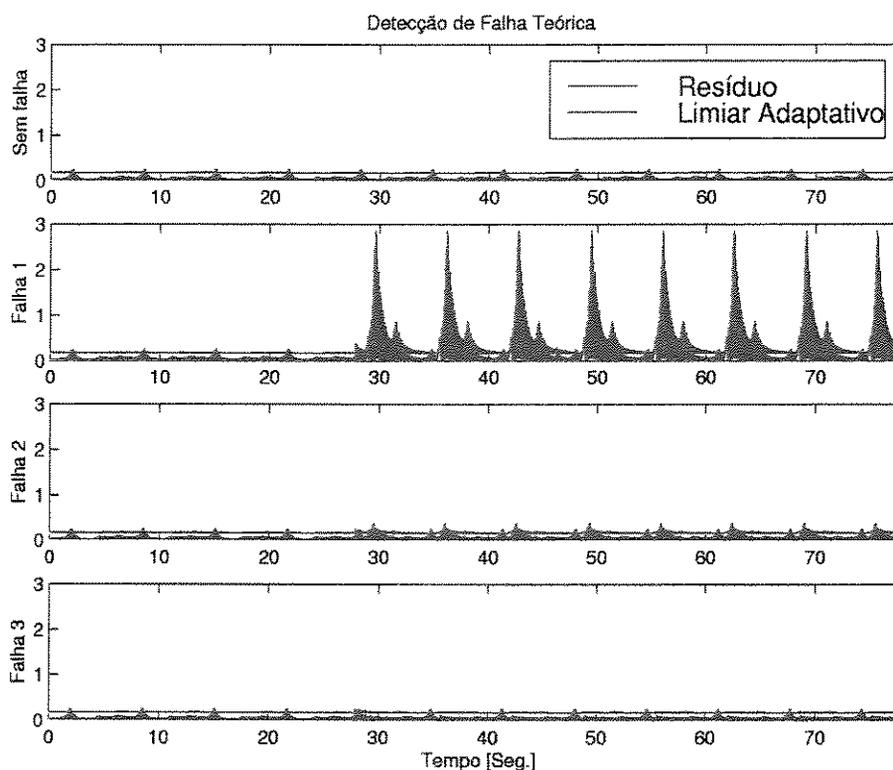


Figura 5.13: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz, usando redes neurais

Na figura 5.13 vê-se que na primeira curva o resíduo permanece acima do limiar durante todo o tempo de simulação, representando uma planta sem falha. A segunda curva mostra que a massa foi detectada aproximadamente aos 30 segundos,

onde nitidamente o resíduo passa o limiar. Além disso nota-se que o resíduo continua acima do limiar durante o restante do tempo da simulação. A terceira e a quarta curvas mostram que não houve grandes mudanças nas amplitudes do resíduo, sendo que mesmo após os 30 segundos o resíduo continua abaixo do limiar.

Viga com controle polinomial

A figura 5.14 mostra a simulação da detecção de falha neural para as respostas ao controle polinomial da viga na faixa de $0 - 500Hz$.

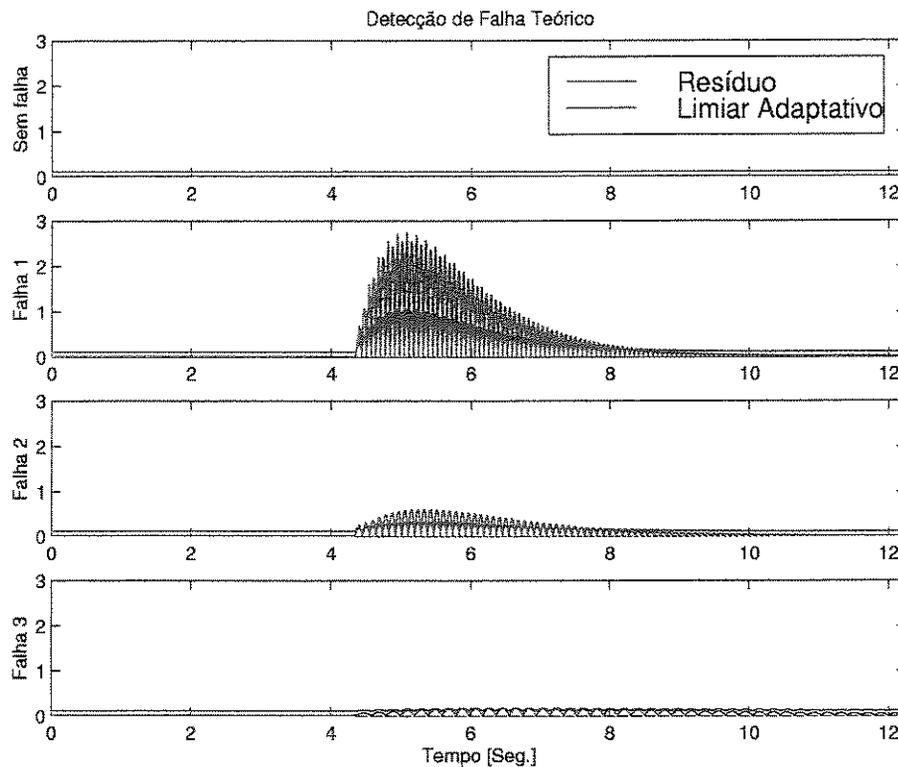


Figura 5.14: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais

Nota-se na figura 5.14 que as mudanças causadas pela adição de massa causam modificações nos resíduos gerados pelo observador neural. Percebe-se que houve detecção apenas para as falhas 1 e 2, e que os resíduos variam de amplitude para cada tipo de defeito, sendo a falha 1 aquela que possui a maior amplitude e a falha 3 a menor. Dessa maneira dois fatos podem ser comentados. Primeiro, as

falhas foram detectadas de forma equivalente somente para as falhas 1 e 2, mas isto não ocorreu com a falha 3. Um fator que teve equivalência, foi que as simulações dos dois métodos mostraram que as amplitudes dos resíduos possuem a tendência de voltar ao patamar abaixo do limiar.

A figura 5.15 mostra a simulação da detecção de falha neural para as respostas ao controle polinomial da viga na faixa de $0 - 78Hz$.

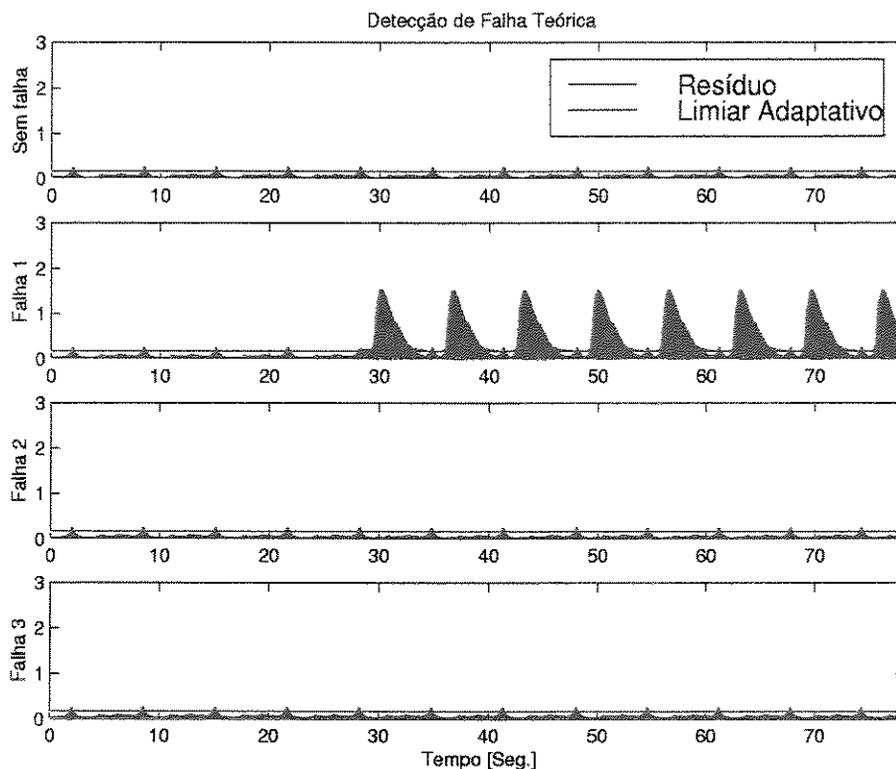


Figura 5.15: Simulação da detecção de falha na faixa de 0-78Hz, usando redes neurais

Nesta simulação, somente a falha 1 foi detectada com boa confiabilidade, ou seja, o resíduo neural ultrapassa satisfatoriamente o limiar. Os demais defeitos não foram detectados, e pelo comportamento mostrado na figura 5.15 pode-se gerar falsos resultados, como por exemplo, viga sem defeito. Estes resultados, entretanto, são semelhantes aos encontrados pelo método de observador de saída, onde são encontradas diferenças nas amplitudes de cada resíduo, mas ambos apresentando mesmo comportamento com relação às análises para detecção. Deve-se entender que o ob-

jetivo é a detecção, e isto é realizado quando o resíduo fica acima do limiar. Assim caso este comportamento seja para ambos os métodos, pode-se dizer que existem desempenhos aproximados, fato mostrado.

Viga com controle adaptativo

Para a variação de massa, a simulação da detecção de falha realizada com a viga controlada adaptativamente foi realizada nas mesmas condições que a viga sem e com controle polinomial. Para a detecção de trinca a simulação foi para a trinca aparecendo na metade do tempo de processamento.

A figura 5.16 mostra a detecção de uma trinca cuja profundidade é 30% da seção transversal da viga.

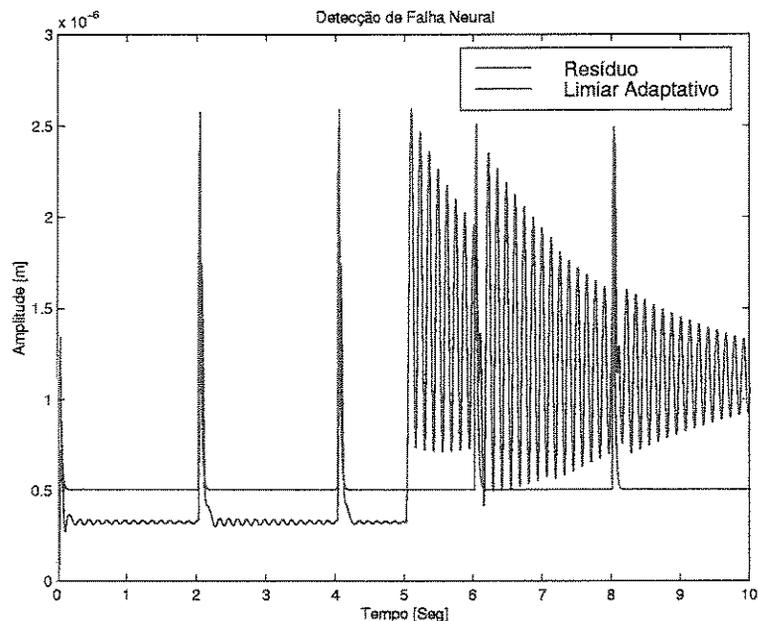


Figura 5.16: Simulação da detecção de trinca na resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais

Na figura 5.16 percebe-se que em 5 segundos o resíduo passa o patamar do limiar, representando um estado de alarme. Nota-se que o resíduo permanece acima do limiar durante todo o restante do tempo da simulação. Este comportamento do resíduo representa um constante estado de alarme, indicando que a planta está com

uma falha permanente em sua estrutura.

A figura 5.17 mostra a detecção de falha usando o método neural.

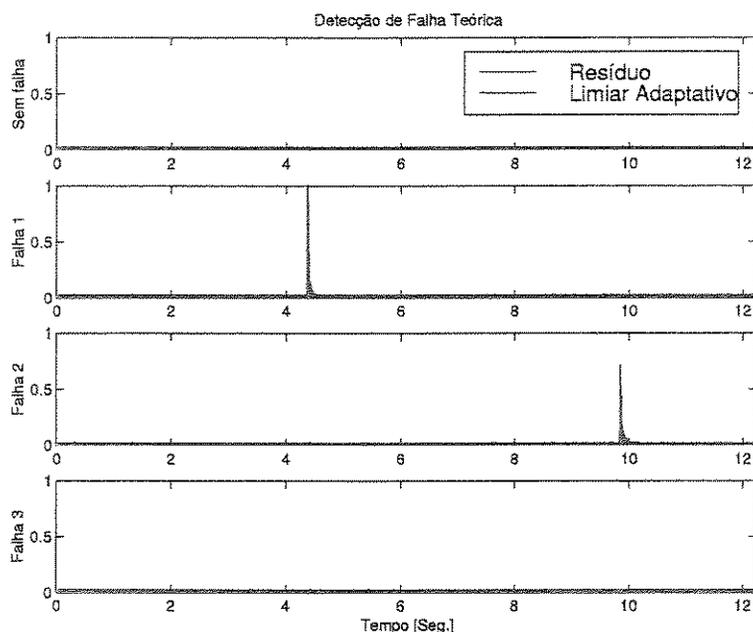


Figura 5.17: Simulação da detecção de falha da resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais

Na figura 5.17 percebe-se que na primeira curva a escala usada não está adequada para mostrar o comportamento do resíduo em relação ao limiar, assim esta figura será apresentada a seguir com outra escala. A curva 2 mostra que o resíduo passa o limiar perto dos 5 segundos. A curva 3 mostra que o resíduo passa o limiar apenas nos 10 segundos, enquanto na curva 4 não é visto se o resíduo passa o limiar.

A figura 5.18 mostra a detecção de falha usando o método neural mas com uma escala adequada para cada curva.

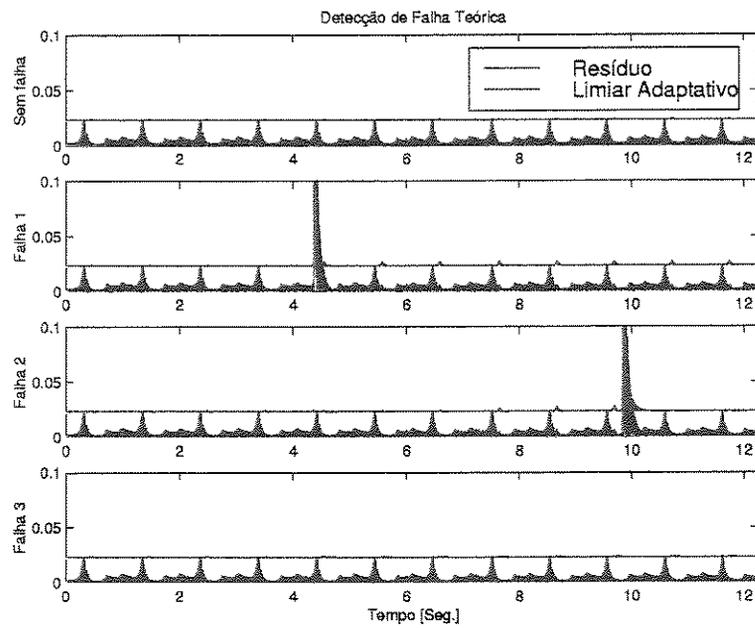


Figura 5.18: Simulação da detecção de falha da resposta ao controle adaptativo, usando redes neurais e nova escala

Na figura 5.18 percebe-se que de fato na primeira curva o resíduo não passa o limiar durante todo tempo de simulação. A curva 2 mostra que o resíduo passa o limiar perto dos 5 segundos mas retorna a um patamar abaixo do limiar em um curto período de tempo. A curva 3 mostra que o resíduo passa o limiar apenas nos 10 segundos mesmo sabendo-se que o defeito começa nos 5 segundos, enquanto na curva 4 não é vista nenhuma situação de alarme, mostrando mais uma vez que a falha simulada nesta posição não foi suficiente para perturbar o sistema.

5.2.2 Resultados Experimentais

Esta estrutura de apresentação seguirá a mesma forma de apresentação dos resultados experimentais referentes ao método de observador de saída.

Viga sem controle

Para comparação com os resultados simulados, foram feitas algumas experiências com o observador neural. Antes de terem sido realizadas as detecções com a viga sendo controlada, foram feitas medidas da viga com adição de massa mas sem atuação de controladores. A figura 5.19 mostra as detecções de falha nas respostas da viga sem controle, na faixa de $0 - 500Hz$.

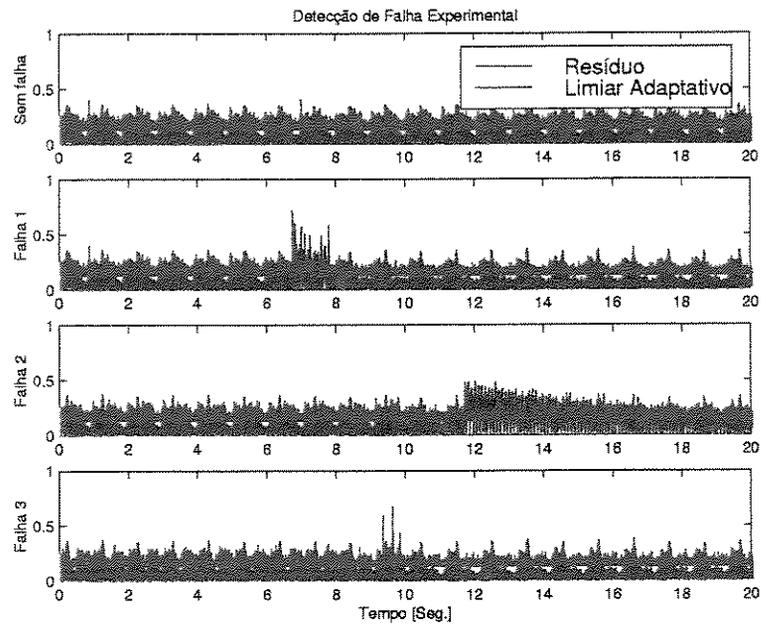


Figura 5.19: Detecção de falha da resposta da viga na faixa de 0-500Hz, usando redes neurais

Percebe-se pela figura 5.19 que existem modificações nas amplitudes dos resíduos, mas estes não conseguem ultrapassar significativamente os limiares. No caso da falha 3, por exemplo, as modificações causadas pela massa não foram suficientes para grandes mudanças, o que poderia levar a uma falsa interpretação de sistema normal. Com relação às falhas 1 e 2, pode-se dizer que foi realizada a detecção, mesmo que não tão visível como nos resultados simulados.

O mesmo experimento foi realizado na faixa de $0 - 78Hz$, que pode ser visto na figura 5.20.

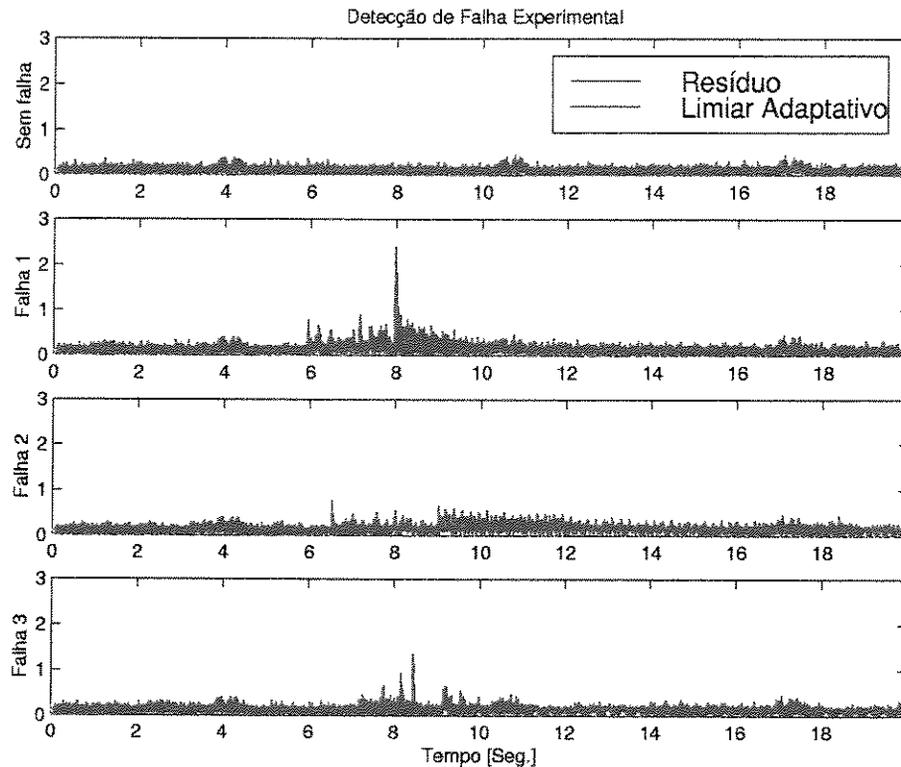


Figura 5.20: Detecção de falha da resposta da viga na faixa de $0-78Hz$, usando redes neurais

Na figura 5.20 as mesmas características comentadas anteriormente repetem-se, sendo a falha 2 a melhor detecção realizada. Embora esteja muito longe da qualidade dos resultados simulados, vê-se uma coerência entre simulação e experimento, uma vez que ambos mostraram que a falha 2 foi a mais fácil para detecção enquanto

a falha 3 foi a mais difícil. Contudo, esta comparação é para dados controlados, de maneira que foi feita uma nova medição, desta vez com a viga submetidas aos controladores.

Viga com controle polinomial

A figura 5.21 mostra as detecções de falha para as respostas da viga ao controle polinomial na faixa de $0 - 500Hz$.

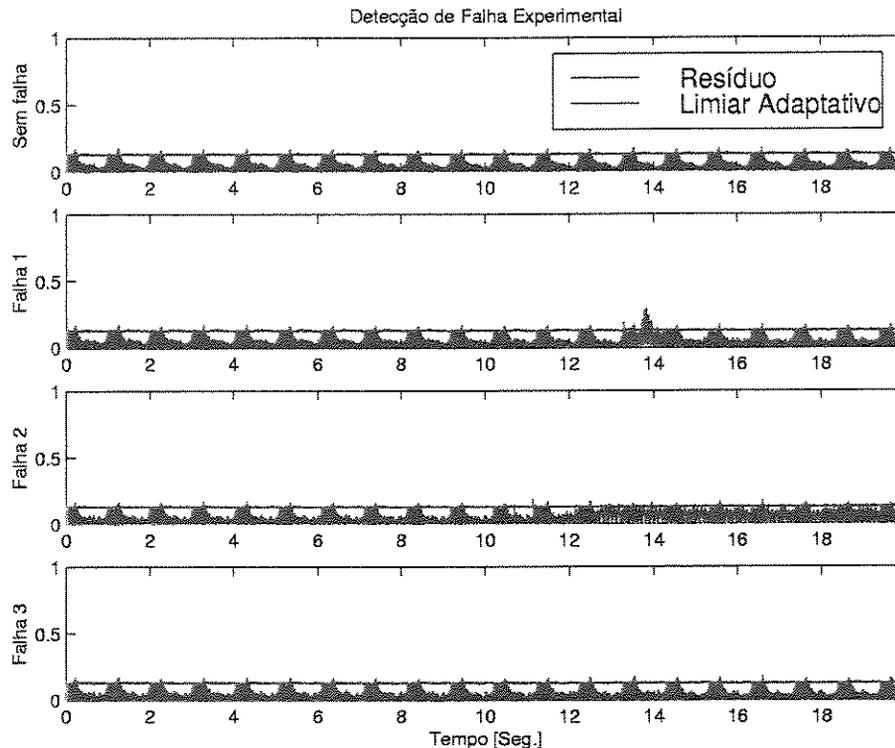


Figura 5.21: Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de 0-500Hz

A figura 5.21 mostra que não foi realizada uma detecção com boa confiabilidade. Percebe-se que os resíduos de todas as falhas não ultrapassam os limites, mostrando que não houve grandes alterações no sistema. Como nesta faixa de frequência não houve uma boa detecção, foi realizado o mesmo experimento para uma faixa menor de frequência.

A figura 5.22 mostra as detecções de falha para as respostas da viga ao controle polinomial na faixa de $0 - 78Hz$.

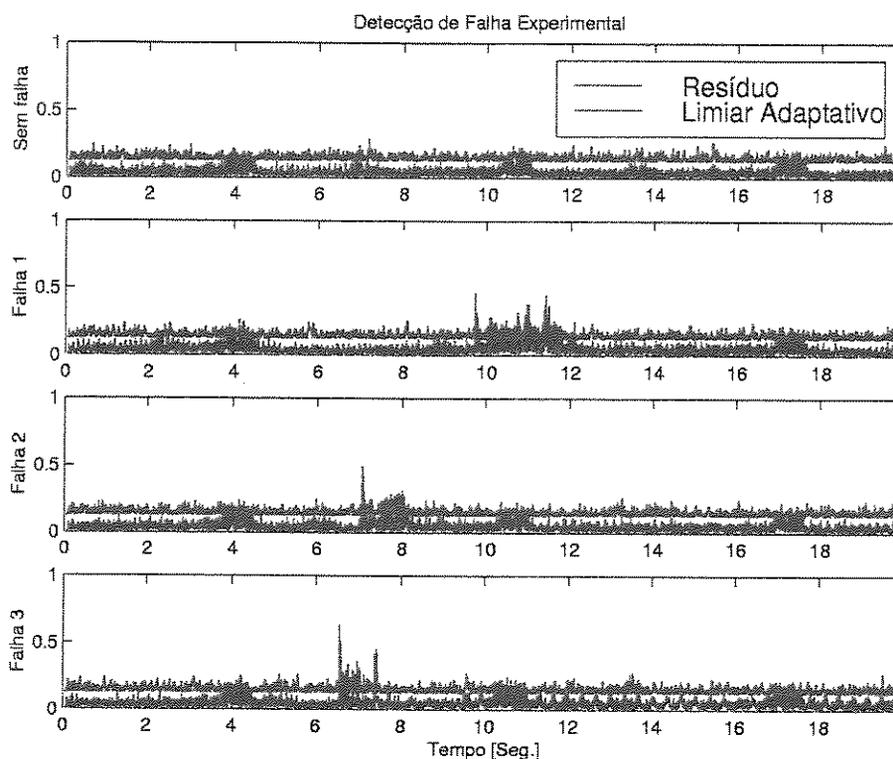


Figura 5.22: Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle polinomial na faixa de $0-78Hz$

A figura 5.22 mostra que não houve uma boa detecção de falha, para esta faixa de frequência mais baixa. Nota-se que o limiar adaptativo compensa as perturbações sofridas pela planta.

Viga com controle adaptativo

A figura 5.23 mostra as detecções de falha para as respostas da viga ao controle adaptativo autosintonizado na faixa de $0 - 78Hz$.

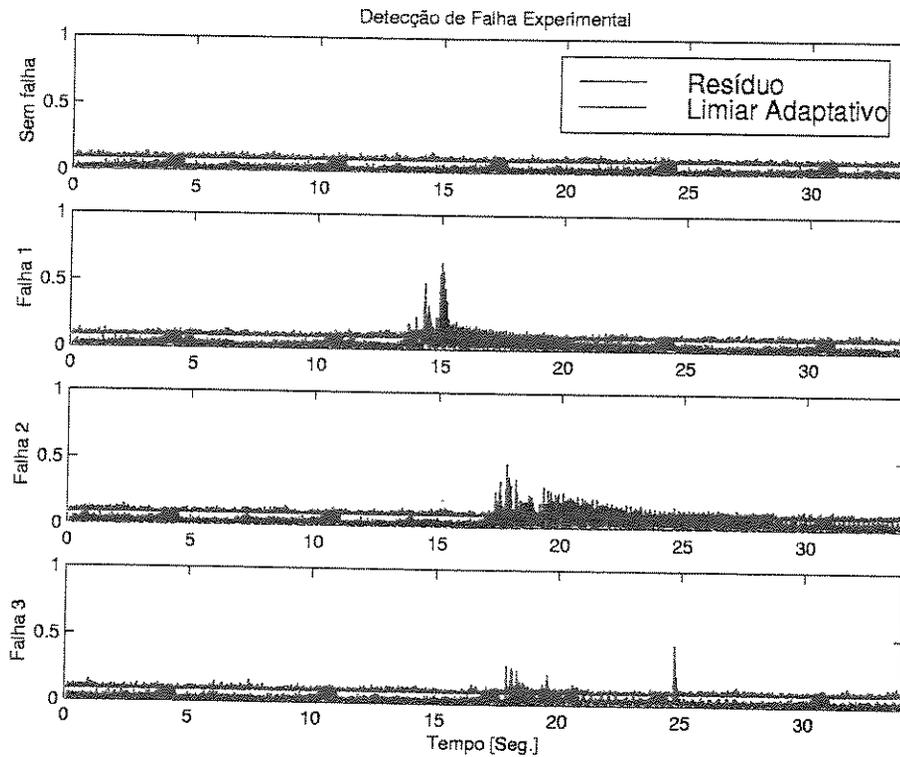


Figura 5.23: Detecção neural de falha da resposta da viga ao controle autosintonizado

Pela figura 5.23 nota-se que houve uma melhora na detecção da falha e percebe-se que o resíduo neural consegue passar o limiar nas falhas 1 e 2, mas a falha 3 novamente não foi alarmada.

5.3 Comparação dos Resultados Obtidos Via Observadores de Saída e Neural

Esta seção fará uma comparação entre os resultados obtidos pelos métodos do observador de saída e observador neural. A análise será feita baseada nos resultados simulados e experimentais, sendo em cada curva de detecção enfatizados os fatos mais pertinentes. Durante toda a seção, serão analisados primeiro os resultados simulados para então analisar-se os resultados experimentais. Todos os comentários serão, na seqüência, a respeito das respostas obtidas nas faixas de $0 - 500Hz$ e $0 - 78Hz$.

5.3.1 Viga Sem Controle

A simulação da detecção da variação de massa realizada na faixa de $0 - 500Hz$ em uma viga sem atuação de controladores mostra que a falha foi detectada satisfatoriamente pelos métodos empregados. Percebe-se, pelos resultados, que a falha simulada na posição 1 foi detectada no mesmo instante mas as amplitudes dos resíduos e dos limiares diferiram-se. Com relação à falha 2 pode-se dizer que os métodos possuíam amplitudes diferentes mas com uma mesmo comportamento, ou seja, a variação nas amplitudes seguiu o mesmo comportamento. A falha 3 mostrou diferença nas amplitudes mas a forma do resíduo e do limiar permaneceram semelhantes entre os métodos. A razão para a diferença nas amplitudes está no fato da não calibração dos sensores e atuadores usados na viga flexível. O que deve-se enfatizar, entretanto, é que os métodos executaram um "disparo" de alarme de forma equivalente, uma vez que o instante e tempo de detecção da falha foi semelhante entre os métodos usados. Além disso era esperado que os métodos possuísem amplitudes diferentes uma vez que o cálculo dos resíduos não são iguais.

Com relação aos resultados simulados na faixa de $0 - 78Hz$ pode-se dizer que também houve uma satisfatória concordância entre eles, uma vez que os alarmes foram executados em tempos equivalentes nas simulações realizadas. Entre as diferenças vistas nos resultados, pode-se dizer que as amplitudes dos resíduos e dos limiares foram muito diferentes, embora tendo comportamentos semelhantes.

Fazendo uma comparação entre as detecções experimentais da variação de massa na viga flexível na faixa de $0 - 500Hz$, nota-se que com exceção das amplitudes dos resíduos e dos limiares, a detecção foi realizada com características semelhantes. Pelos métodos usados, a falha 1 foi detectada aproximadamente em 7 segundos entretanto, após 8 segundos, o resíduo gerado pelo observador neural difere do resíduo do observador de saída. Vê-se que o resíduo neural mostra picos periódicos acima do limiar enquanto no resíduo calculado pelo observador de saída vê-se uma redução de sua amplitude. Este comportamento pode ser justificado pela formulação matemática, uma vez que a estimação da saída da planta por redes neurais pode ser menos precisa que a estimação da resposta da planta com o observador de saída. Além disso como

a rede neural foi treinada para estimar apenas o comportamento sem falha da viga, qualquer variação no sistema pode modificar sensivelmente o resíduo neural. Com relação à falha 2, é vista uma boa equivalência entre os resultados, uma vez que o tempo de alarme e a forma dos sinais foram equivalentes. Com relação à falha 3, notam-se pequenas diferenças nos resíduos mas diferenças que não são significativas para gerar um alarme falso. Resumindo, apesar de algumas diferenças existentes entre os métodos, as detecções de variação de massa pelos métodos de saída e neural, realizada na faixa de $0 - 500Hz$ com a viga sem controle, foram equivalentes.

Comparando os resultados experimentais para a análise realizada na faixa de $0 - 78Hz$ nota-se que os resultados foram novamente equivalentes. Porém a qualidade da detecção não foi adequada, pois percebe-se em ambos métodos que o resíduo passa em pequena escala do limiar, o que pode causar falsas interpretações e por conseguinte falsos alarmes. Isto pode ser explicado pelo baixo nível do sinal atribuído aos métodos, o que fez com que a relação sinal/ruído diminuísse. Mesmo assim, vê-se que o comportamento dos resíduos e limiares nas falhas 1, 2, e 3 foi equivalente.

5.3.2 Viga Com Controle Polinomial

A simulação da detecção da variação de massa realizada na faixa de $0 - 500Hz$ em uma viga com controle polinomial mostra que a falha foi detectada satisfatoriamente pelos métodos empregados. Na simulação da falha 1 vê-se que o resíduo apresentou o mesmo comportamento, o que já não pode ser dito com relação aos limiares que, embora ficassem abaixo do resíduo no momento da falha, apresentaram comportamentos diferentes. As amplitudes dos resíduos e dos limiares diferiram novamente em valores consideráveis. A falha 2 foi detectada mais claramente com o método do observador de saída uma vez que foi com este método que as amplitudes do resíduo passaram em maior escala o limiar. Esta mesma característica pode ser vista na falha 3, onde o resíduo passa o limiar com maior intensidade no método do observador de saída. Portanto, para o caso controlado só verifica-se uma boa equivalência nos casos onde não há falha e na falha realizada na posição 1. Pode-se ver que existe uma tendência do mesmo comportamento em ambos os métodos mas,

como dito anteriormente, com uma maior coincidência na simulação da ausência da falha e na falha 1.

As simulações realizadas na faixa de $0 - 78Hz$ mostram uma maior concordância entre os resultados nas ausência de falha e nas falhas 1 e 3. Os alarmes foram executados em tempos equivalentes e as formas dos resíduos e limiares permaneceram semelhantes. O fato negativo a ser mencionado é que na falha 2 o método do observador de saída mostrou que o resíduo fica acima do limiar durante todo o tempo de simulação após a adição da massa, fato que não foi mostrado no método neural. Além disso, mais uma vez as amplitudes geradas não foram as mesmas.

As detecções experimentais da variação de massa na viga flexível, na faixa de $0 - 500Hz$, mostram resultados que não são satisfatórios. Vê-se que as mudanças nos resíduos calculadas pelo método do observador de saída são mais notórias que as mudanças nos resíduos neurais. Nas falhas 1, 2 e 3, os resíduos neurais foram muito pouco afetados pela adição da massa enquanto vê-se pelo outro método que a adição de massa foi suficiente para gerar uma situação de alarme. Nota-se ainda que, na falha 2, a massa causa uma instabilidade no sistema e por causa disso o resíduo permanece acima do limiar durante todo tempo de medição. Dessa forma pode-se dizer que para a viga com controle polinomial o observador neural não executou sua tarefa de maneira adequada.

Na análise realizada na faixa de $0 - 78Hz$ nota-se que os resultados foram novamente equivalentes porém, percebe-se em ambos os métodos o resíduo passa em pequena escala o limiar, o que pode causar falsas interpretações e por conseguinte falsos alarmes. Assim como em resultados anteriores, pode-se explicar este efeito devido aos baixos níveis de sinais atribuídos aos métodos. Como o sinal possui um nível muito baixo fica difícil a execução do controle e conseqüentemente uma boa aquisição de sinais controlados.

5.3.3 Viga Com Controle Adaptativo

Dois tipos de falhas foram simuladas para comparação dos métodos de detecção, o aparecimento de uma trinca com uma profundidade de 30% da seção

transversal e variação de massa em três posições distintas. Com relação à simulação da detecção da trinca na viga, os dois métodos comportaram-se de forma equivalente. Em 5 segundos os resíduos passam o limiar e permanecem durante todo o tempo da simulação. A diferença vista neste caso foi que o resíduo neural possui oscilações após o aparecimento da trinca, fato que não foi visto no resíduo calculado pelo método do observador de saída. Esta oscilação, todavia, não foi capaz de causar falsos alarmes.

Ainda com relação às simulações, mas tratando do caso de variação de massa, nota-se que os métodos foram equivalentes. Vê-se que o caso sem falha foi reconhecido como tal e que as falhas foram detectadas de forma semelhante, embora algumas diferenças tenham sido registradas. A diferença vista, mas que não foi suficiente para gerar falsos alarmes, foi que a forma dos resíduos e limiares neurais foram diferentes, gerando picos periódicos nos resíduos neurais.

Para os resultados experimentais apenas as detecções de variação de massa foram implementadas, com o experimento feito na faixa de $0 - 78Hz$. Comparando os resultados vê-se que existe uma concordância entre os valores, embora os resíduos gerados pelo observador de saída permaneçam durante um maior tempo acima do limiar. Isto mostra que a qualidade do resíduo do observador de saída está melhor, mas este resultado não impede de dizer que nesta aplicação o resíduo neural possui as mesmas características do primeiro método. Quando não existiu falha nenhum método gerou falsos alarmes. Na falha 1 ambos os métodos alarmaram no mesmo instante e, além disso, o resíduo retornou ao patamar inferior aproximadamente no mesmo momento. A falha 2 possuiu a mesma forma para os métodos, com a diferença de que o resíduo neural voltou a valores abaixo do limiar mais rápido que o resíduo calculado com base no observador de saída. Na falha 3 pôde-se ver uma equivalência entre os resultados, onde os instantes de alarme coincidem consideravelmente.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões Finais

O objetivo deste trabalho foi estudar a detecção de falha em uma viga usando redes neurais. Para mostrar as vantagens e desvantagens de uma rede neural como método de acionamento de alarmes em um sistema com falha, foi realizada uma série de trabalhos que podem ser divididos nas seguintes etapas:

- Modelagem matemática da planta a ser estudada, no caso uma viga.
- Validação do modelo através de uma identificação experimental.
- Modelagem matemática de dois tipos de defeitos, trinca e variação de massa.
- Implementação de dois métodos de controle: polinomial e adaptativo autosintonizado.
- Detecção de falha usando uma abordagem de observadores de saída para ambientes simulados e experimentais.
- Detecção de falha usando redes neurais, que foi chamado de observador neural testados por simulações e experimentos.

A representação da viga flexível através de modelos matemáticos mostrou-se satisfatório. O método de elementos finitos usado, forneceu as frequências naturais

e os modos de vibração de modo que uma função de transferência entre força e deslocamento foi estabelecida. Como viu-se nos resultados, este modelo foi admitido válido com uma comparação entre FRFs teóricas e experimentais.

Após a validação do modelo foram realizados estudos com a viga flexível. Os trabalhos simulados foram a respeito do aparecimento de uma trinca em uma viga controlada adaptativamente, e de uma variação de massa em uma viga controlada pelos métodos polinomial e adaptativo autosintonizado. Os resultados sobre a simulação de uma trinca na viga mostra que caso esta falha apareça durante as medições, ocorre uma variação nas amplitudes, onde o controle perde a eficiência nas atenuações de vibração. Entretanto, o método adaptativo autosintonizado mostrou-se capaz de acomodar novamente as amplitudes. Com relação aos resultados simulados dos defeitos aplicados à viga com controle polinomial e adaptativo, os resultados tiveram a mesma tendência: as amplitudes variam com o aparecimento do defeito, mas estas variações foram maiores nos casos onde havia atuação de um controlador. Ainda, os resultados do controle adaptativo mostram-se capazes de uma nova acomodação das amplitudes. Para a variação de massa com controle polinomial, foram simuladas falhas para duas faixas de frequência $0 - 78Hz$ e $0 - 500Hz$. Foi visto que as falhas são muito mais visíveis na maior faixa de análise, uma vez que os níveis de sinais são maiores. Desta forma conclui-se que um controlador pode alterar o efeito da variação de massa e de uma trinca. Um controle de parâmetros constantes (polinomial), a depender da faixa de frequência controlada, causa grandes perturbações na planta. Um controle com estimação de parâmetros (adaptativo autosintonizado), objetiva estimar valores independente das perturbações externas, assim o método pode estimar valores novos a medida que as falhas vão aparecendo. Do ponto de vista da detecção de falha, é um problema, uma vez que para o controle trata-se de uma planta nova e não do sistema anterior com falha. Justificando-se métodos específicos para detecção de falha. Além disso a posição em que a falha aparece modifica os resultados.

Tendo uma validação do modelo e realizado trabalhos simulados, fez-se experimentos com a viga sem controle, com controle polinomial, e controle adaptativo autosintonizado. Os experimentos foram para as duas faixas de frequências citadas no parágrafo anterior, com exceção do controle adaptativo, feito somente para faixa

0 – 78Hz, já que as condições experimentais não permitiram uma faixa maior de análise. Pela comparação entre as respostas experimentais, pode-se dizer que o controle pode afetar a falha aplicada à viga, uma vez que as saídas controladas mostram-se diferentes das respostas livres. Notou-se também que a variação de massa na viga controlada adaptativamente não causou mudanças quando comparadas as respostas não controladas. Isto é explicado no fato que o controle foi realizado até a segunda frequência natural, faixa de análise que caracterizou-se por possuir um nível baixo de sinal. A massa adicionada também causou um aumento do nível de ruído, fato que foi comprovado com as medições na hora da adição da massa e após um certo tempo de sua inclusão.

Com as simulações e medições, realizou-se uma detecção de falha por observadores de saída. Com este métodos as falhas simuladas e medidas na posição 1 e 2 foram detectadas em todos os casos estudados, ou seja, com e sem uso de controle de vibração. A falha 3 mostrou-se ser de difícil detecção e em alguns casos não houve nenhum disparo da falha. Este comportamento ocorreu tanto nas simulações quanto nas medições. Conclui-se então, que esta posição é de difícil medição deste que seja dado a posição 3 a mesma energia dada para a posição 1 e 2. Isto é devido ao fato de que a massa adicionada na posição 3, ao contrário da posição 1 e 2, gera uma viga com maior inércia e conseqüentemente maior dificuldade de excitação e medição de sinal. Neste método o limiar desempenhou um importante papel, uma vez que seu caráter adaptativo foi capaz de reconhecer as variações aceitáveis da planta.

Por fim foi comparado aos resultados a detecção de falha por observadores neural. Acredita-se, que houve uma boa aplicabilidade do método, necessitando porém de maiores investigações. Tais melhorais podem ser obtidas com treinamentos mais precisos, usando-se topologias mais adequadas e padrões de treinamento mais confiáveis. Os dados experimentais estavam com certo nível de ruído, o que dificultou o treinamento. Como viu-se a topologia da rede neural foi relativamente grande, uma vez que só esta configuração foi capaz de reproduzir experimentalmente a viga. Conclui-se que dentro das condições de trabalho o observador neural comportou-se satisfatoriamente, necessitando para tanto maiores testes para uma generalização.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho, vários problemas vieram à tona e portanto podem ser temas de pesquisas futuras, os quais são listados abaixo:

- Mais trabalhos experimentais com observadores de saída;
- Comparação entre observador de saída e observadores baseados em filtros de Kalman;
- Estudo comparativo entre o observador neural implementado e outros métodos baseados em redes neurais;
- Otimização do método de implementação do controle adaptativo autosintonizado;
- Estudo de robustez da rede neural na detecção de falha.

6.3 Trabalhos Gerados como Parte da Dissertação

Durante o desenvolvimento do trabalho dois trabalhos foram submetidos e aceitos em congressos:

- Alves Jr., Marco A. e Nóbrega, Eurípedes; Detecção Neural de Trincas em Uma Viga Controlada Ativamente, *XV COBEM*, Águas de Lindóia - SP, 1999.
- Nóbrega, Eurípedes; Alves Jr., Marco A. and Grigoriadis, Karolos; Neural Fault Detection of an Adaptive Controlled Beam, *ACC - American Control Conference*, July 2000.

Bibliografia

- [1] Edward Y. Chow and Alan S. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, AC-29(7):603–614, JULY 1984.
- [2] A. S. Willsky. A survey of design methods for failure detection in dynamics systems. *Automatica*, 12:601–611, 1976.
- [3] H. L. Jones. *Failure Detection in Linear Systems*. PhD thesis, Dep. Aero. and Astro., Mass. Inst. Technol., Cambridge, 1973.
- [4] A. S. Willsky and H. L. Jones. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, AC-21:108–112, February 1976.
- [5] D. E. Gustafson, A. S. Willsky, and J. Y. Wang. Final report: Cardiac arrhythmia detection and classification through signal analysis. *The Charles Stark Draper Lab., Cambridge, MA*, pages R-920, July 1975.
- [6] Xi-Cheng Lou, Alan S. Willsky, and George C. Verghese. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems. *Automatica*, 22(3):333–344, 1986.
- [7] Abbas Emami-Naeini, Muhammad M. Akhter, and Stephen M. Rock. Effect of model uncertainty on failure detection: The threshold selector. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 33(12):1106–1115, DECEMBER 1988.

- [8] Paul M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459–474, 1990.
- [9] Xianchun Ding and Paul M. Frank. Fault detection via factorization approach. *Systems Control Letters*, 14:431–436, 1990.
- [10] Paul M. Frank. Principles of model-based fault detection. *IFAC Artificial Intelligence in Real-Time Control*, pages 213–220, 1992.
- [11] Paul M. Frank and Xianchun Ding. Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model-based fault diagnosis. *Automatica*, 30(5):789–804, 1994.
- [12] Paul M. Frank and X. Ding. Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. *Elsevier Science*, pages 403–424, 1997.
- [13] Z. L. Kovács. *Redes Neurais Artificiais: fundamentos e aplicações*. Edição Acadêmica, 1996.
- [14] W. McCulloch and W. Pitts. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5:115–133, 1943.
- [15] D. O. Hebb. *The organization of behaviour*. Wiley, New York, USA, 1949.
- [16] F. Rosenblatt. *Principles of neurodynamics: perceptron and theory of brain mechanisms*. Spartan Books, New York, USA, 1962.
- [17] M. L. Minsky and S. Papert. *Perceptrons*. MA: MIT Press, 1969.
- [18] J. J. Hopfield. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the national academy of sciences*, 79:2554–2558, 1982.

- [19] D.E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams. Learning internal representations by error propagation. *parallel distributed processing (PDP)*, 1:318–362, 1986.
- [20] K. S. NARENDRA and K. PARTHASARATHY. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Transaction on NEURAL NETWORKS*, 1(1):4–27, MARCH 1990.
- [21] Arsiel U. Levin and Kumpati S. Narendra. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks: Controllability and stabilization. *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, 4(2):192–205, MARCH 1993.
- [22] Arsiel U. Levin and Kumpati S. Narendra. Control of nonlinear dynamical systems using neural networks - part ii: Observability, identification, and control. *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, 7(1):30–42, JANUARY 1996.
- [23] S. M. Yang and G. S. Lee. Vibration control of smart structures by using neural networks. *Transaction of the ASME*, 119:34–39, MARCH 1997.
- [24] Evaldo Khater. *Controle de vibração torcional em sistemas rotativos usando redes neurais multicamadas*. PhD thesis, UNICAMP, 1998.
- [25] K. Watanabe, Seichi Hirota, and Liya Hou. Diagnosis of multiple simultaneous fault via hierarchical artificial neural networks. *AIChE Journal*, 40(5):839–848, MAY 1994.
- [26] A. T. Vemuri and M. M Polycarpou. Neural networks based robust fault diagnosis in robotic systems. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(6):1410–1420, November 1997.
- [27] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor. *Defined Element Method*. Mc Graw Hill, fourth edition, 1994.
- [28] G. L. Qian, S. N. Gu, and J. S. Jiang. The dynamic behaviour and crack detection of a beam with a crack. *Journal of Sound and Vibration*, 138(2):233–243, 1990.

- [29] M. Géradin and D. Rixen. *Mechanical Vibrations*. John Wiley & Sons, second edition, 1997.
- [30] D. J. Ewins. *Modal Testing: Theory and Practice*. RSP, 1986.
- [31] Karl J. Aström and Bjorn Wittenmark. *Computer-Controlled Systems. Theory and Design*. Prentice Hall, third edition, 1997.
- [32] Karl J. Aström and Bjorn Wittenmark. *Adaptive Control*. Addison-Wesley Pub. Co., second edition, 1995.
- [33] Paul M. Frank. Enhancement of robustness in observer-based fault detection. *INT. J. Control*, 59(4):955–981, 1994.
- [34] Simon Haykin. *Neural Networks A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall, second edition, 1999.
- [35] T. P. Vogl, Rigler Mangis J. K. A. K., W. T. Zink, and D. L. Alkon. Accelerating the convergence of the back-propagation method. *Biological Cybernetics*, 59(4):257–263, 1998.
- [36] SSU-HSIN Yu and ANURADHA M. ANNASWAMY. Stable neural controllers for nonlinear dynamic systems. *Automatica*, 34(5):641–650, 1998.
- [37] T. Marcu, L. Mirea, and P. M. Frank. Neural observer schemes for robust detection and isolation of process faults. *UKACC Intenational Conference on CONTROL*, (455):1–4, September 1998.
- [38] Sinnasamy R. Naidu, E. Zafriou, and T. J. McAvoy. Use of neural networks for sensor detection in a control system. *American Control Conference, Pittsburgh, Pennsylvania*, pages 21–23, June 1989.
- [39] P. D. Wasserman. *Neural computing: Theory and parctice*. Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [40] K. Hornik and White H. Stinhcombe. Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, 2:359–366, 1989.

- [41] Pablo Siqueira Meirelles. Simulação experimental de vibrações para teste dinâmico de estruturas com não linearidade. Master's thesis, UNICAMP, 1989.
- [42] M. R. Schroeder. Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation. *IEEE Transaction on Information Theory*, pages 85–89, January 1970.

Apêndice A

BANCADA EXPERIMENTAL

Este apêndice trata das tarefas realizadas na implementação da instrumentação usada na bancada experimental. Sendo concentrado o trabalho na configuração do sistema de aquisição de dados, através do desenvolvimento de programas em linguagem C e na colagem dos materiais piezoelétricos, PZT, viga flexível.

A.1 Descrição da Bancada Experimental

A bancada experimental consiste de viga flexível, cujo material é o alumínio, possuindo 6 sensores/atuadores. A figura A.1 mostra a configuração da bancada experimental, onde em primeiro plano encontra-se a viga flexível.

A figura A.2 mostra com mais detalhe a viga flexível, ressaltando a disposição dos sensores e atuadores.

Os sensores e atuadores da viga flexível são de material piezoelétrico (PZT) que foram usados em pares e têm a capacidade de executar a função de sensor ou atuador. Dessa maneira, existem 2 pares de PZT's que realizam a função de atuadores enquanto apenas um par de PZT são sensores. Os PZT's mais próximos ao engastamento são destinados ao sinal de perturbação, os dois seguintes destinados ao sinal de controle e os dois últimos à leitura da resposta da viga.

Para aquisição de dados, foi usado um sistema denominado Autobox. Este equipamento possui 32 canais analógicos de entrada de 16 bits, 5 canais analógicos de

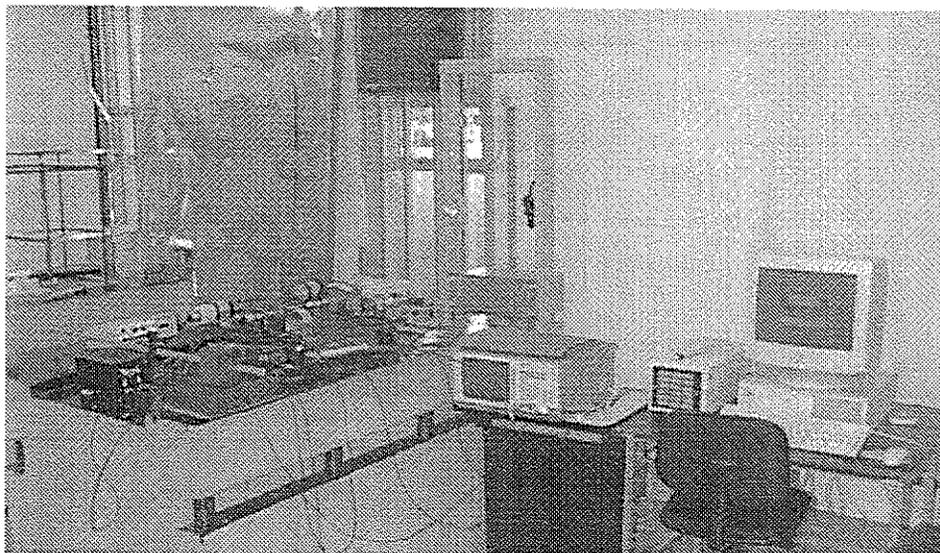


Figura A.1: Vista Frontal da Bancada Experimental

saída de 12 bits, 16 canais de entrada e saída digitais e entrada para 4 encoders. A fabricação é da empresa alemã dSPACE, sendo este equipamento cedido em comodato para o projeto pela EATON. Para realização dos módulos de aquisição e processamento dos sinais, programas em linguagem C foram aperfeiçoados ou desenvolvidos. Tais programas podem ser vistos no apêndice B.

Para uso do sistema de dSPACE foram criados pacotes de programas, onde as configurações para realização de identificação, controle dos sistemas mecânicos e os métodos do projeto encontram-se disponíveis. Assim, módulos para excitação senoidal, quadrada, varredura senoidal e sinais randômicos, estão disponíveis para uso. Além disso, uma biblioteca matricial está disponível, sendo esta responsável pela implementação dos métodos de controle nos sistemas mecânicos. Dessa maneira, diversos blocos de programação foram usados na viga flexível.

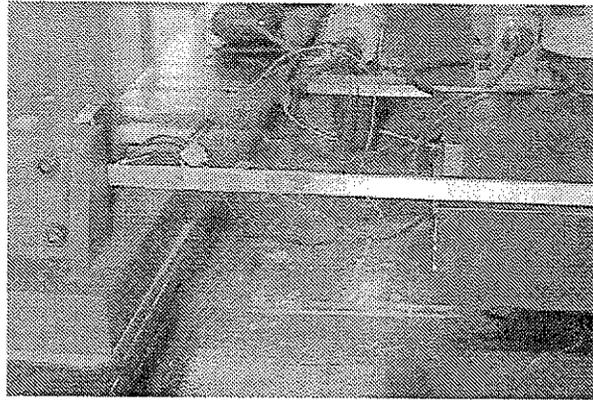


Figura A.2: Vista da Viga Flexível

A.2 Sistema de Aquisição de Dados

Para integração com as placas de aquisição da dSPACE, alguns programas interagem com o sistema, entre os quais, um “cross-compiler” que faz a comunicação entre a linguagem usada para programação e o DSP (“digital signal processor”) do sistema, um programa de monitoramento de sinais, chamado Trace, em tempo quase-real, e um programa que permite alterações de parâmetros em tempo-real, chamado Cockpit. Todos os módulos para identificação e controle foram implementados na linguagem C, permitindo uma maior flexibilidade na execução do projeto, como o projeto de janelas e variáveis a serem monitoradas ou atualizadas.

Um programa foi desenvolvido para identificação, onde usou-se um sinal pseudo-aleatório como perturbação, [41] e [42], e a resposta medida em tempo quase real. Analogamente, foram desenvolvidos programas específicos que realizassem o controle polinomial, o controle adaptativo, a detecção por observadores robustos e por observadores neurais.

A figura A.3 abaixo mostra um exemplo da “interface” do programa Trace usado no experimento de identificação da viga flexível. O controle desta “interface” é feita através de uma sintaxe própria da dSPACE, onde pôde-se entendê-la via manuais do AUTOBOX. Para implementação destes ambientes, usou-se uma linguagem própria do sistema de aquisição de dados, o qual é obrigatório estar conectado ao programa principal realizado pela linguagem C. Exemplos de alguns programas em

linguagem C podem ser vistos no apêndice B.

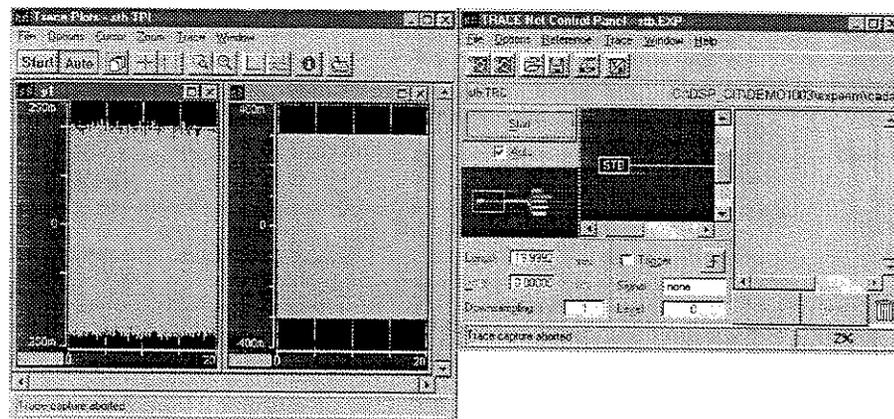


Figura A.3: Programa para monitoramento dos sinais

Pode-se ver abaixo o código usado para gerar a janela mostrada na figura A.3.

```
***** stb.trc*****
      Gera a janela do Trace
*****

sampling_period = 3.2E-3

-- signals available for TRACE
--
-- signal name      type  address

group "On-Line Estimation"

      y              flt
      r              flt
      z              flt
```

```
group "Output"
  sig          flt
  u            flt
  "Control Law"  renames u
endgroup

group "Estimation Teta"
  a1          flt
  a2          flt
  a3          flt
  a4          flt
  b0          flt
  b1          flt
  b2          flt
  b3          flt
endgroup

group "Estimation Parameters"
  TRC          flt
  "Trace P(t)"  renames TRC
endgroup

group "Turn on/off"
  turn          flt *
endgroup

group Execution
  exec_time     flt
endgroup
```

endgroup

Na figura A.3 somente os parâmetros de excitação e respostas estão sendo monitorados, mas existe a possibilidade de outros parâmetros serem acompanhados, como o traço da matriz de covariância, a estimação dos parâmetros da planta.

A figura A.4 mostra o programa Cockpit, neste exemplo ele é responsável por ligar ou desligar o sinal de controle aplicado à viga flexível.

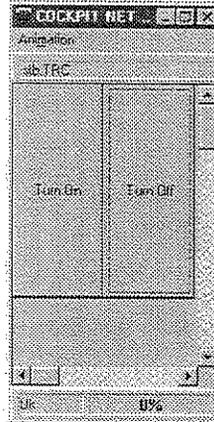


Figura A.4: Programa para atualização on-line dos parâmetros

Nota-se abaixo o código usado para gerar a janela de atualização de parâmetros.

```
***** stb.ccs*****
```

Gera a janela do Cockpit

```
*****
```

```
SECTION HEADER
```

```
BLOCK HEADER
```

```
Id = "Cockpit ccs file Vs 1.5"
```

```
Date = "Wed Jan 19 09:55:11 2000"
```

```
System = 1
```

```
ENDBLOCK
```

```
ENDSECTION SECTION APPLICATION
```

```
BLOCK HEADER
```

```
TraceFileName = "stb.TRC"
InitialValueMode = read_from_hardware
WinXPos = 85
WinYPos = 61
WinWidth = 171
WinHeight = 286
ShowToolBar = yes
ENDBLOCK
ENDSECTION SECTION PUSHBUTTON
BLOCK BASICS
Label = "Turn On"
XPos = 7
YPos = 32
Width = 70
Height = 145
CurrentValue = 1.000000e+000
ForegroundColor = 23
BackgroundColor = 1
FontName = "MS Sans Serif:0012"
ENDBLOCK
BLOCK VARIABLE
VariableName = "turn"
VariablePath = "On-Line Estimation/Turn on\off"
VariableType = "flt *"
ENDBLOCK
BLOCK PRIVATE
Value = 1.000000e+000
ENDBLOCK
ENDSECTION SECTION PUSHBUTTON
BLOCK BASICS
Label = "Turn Off"
```

```
XPos = 82
YPos = 32
Width = 70
Height = 145
CurrentValue = 0.000000e+000
FgColorIndex = 23
BgColorIndex = 1
FontName = "MS Sans Serif:0012"
ENDBLOCK
BLOCK VARIABLE
  VariableName = "turn"
  VariablePath = "On-Line Estimation/Turn on\./off"
  VariableType = "flt *"
ENDBLOCK
BLOCK PRIVATE
  Value = 0.000000e+000
ENDBLOCK
ENDSECTION
```

O código acima pode ser gerado tanto pelo usuário através de simples digitação, como através de um "template" (modelo de janela do Cockpit).

Apêndice B

LISTAGEM DE PROGRAMAS EM LINGUAGEM C

```
/****** stb.C *****/
```

```
Programa de controle adaptivo com  
uma varredura senoidal ate 78Hz.  
A detecção de falha sera  
realizada off-line.
```

Marco Antonio de O. Alves Jr.

DMC/FEM/UNICAMP

```
*****/
```

```
#include <brtenv.h> /* basic real-time environment */  
#include <math.h> /* Math function */  
#include "rls.c"  
#include "diofan1.c"  
#include "lawrst.c"  
#include "sch2p.h"  
  
#define length_A 5
```

```

#define length_B 4
#define length_ACL 8
#define RES 20e5
#define CHANNELS 3 /* channel's number macro */
#define NPT 2048
#define DT 3.2E-3 /* 78.125 Hz (4 points per period)*/
#define INPUT(u) {ds2003_start(DS2003_1_BASE); ds2003(DS2003_1_BASE,u);}
#define OUTPUT(y, chh) ds2101(DS2101_1_BASE, chh, y)
#define TMRO 0
#define TURN 0
#define MAX_SWP 33 /* Maximum Sweep Amplitude */

long chn[CHANNELS] = {1,2,3};
long rng[CHANNELS] = {DS2003_RNG_10,DS2003_RNG_10,DS2003_RNG_10};
long res[CHANNELS] = {DS2003_RES_16,DS2003_RES_16,DS2003_RES_16};
float mm[CHANNELS];
float sig, y, z, r;
float a1, a2, a3, a4, b0, b1, b2, b3;
float TRC;
float *turn = (float *) (DP_MEM_BASE);
double trc=0.0, u;
double tetach[8][1] =
{-1.1374, -0.2523, 0.0548, 0.3817, -0.0007, 0.0049, -0.0074, 0.0034};
int i, j;
int k = 0;

float exec_time; /* execution time */
unsigned long count0; /* timer0 time count */

/* error flag for CHKERR at last dual-port memory location */
volatile int *error = (int *) (DP_MEM_BASE + DP_MEM_SIZE - 1);

```

```

void isr_t0()                /* timer0 interrupt service routine */
{
    begin_isr_t0(*error);    /* overload check */
    service_trace();        /* call TRACE service (TRACE < Vs 3.1) */
    service_mtrace("0");    /* call TRACE service (TRACE >= Vs 3.1) */
    count0 = count_timer(TMR0); /* save current timer count */

    sig = 0.6*sw2[k]/MAX_SWP;

    r = 2*mm[0];
    y = 10*mm[1];
    z = mm[2];
    INPUT(mm);

    /*Parameters Visualization */
    a1= (float) TETACH[0][0];
    a2= (float) TETACH[1][0];
    a3= (float) TETACH[2][0];
    a4= (float) TETACH[3][0];
    b0= (float) TETACH[4][0];
    b1= (float) TETACH[5][0];
    b2= (float) TETACH[6][0];
    b3= (float) TETACH[7][0];

    /* Function Estimation*/
    estima(FI, y);

    /* Diophantine Solution*/
    diofan1(a1, a2, a3, a4, b0, b1, b2, b3);

```

```

/* RST -> Control Law */
  if(u <=-1e12 | u>=1e12) u = 1e3;
u = lawrst(R, S, r, y, u);

OUTPUT(sig,1);
if(*turn==1) OUTPUT(u,2);

/* Buffer Generation of FI*/
for (i = NPAR/2; i >= 1 ; i--) FI[i][0] = FI[i-1][0];
FI[0][0]= -y;

for (i = NPAR-1; i >= NPAR/2 ; i--) FI[i][0] = FI[i-1][0];
FI[NPAR/2][0] = r;

/* P(t) Criterion Reseting */
for(i=0; i < NPAR; i++) trc += P[i][i]*P[i][i];
TRC = (float) trc;
if (trc >= RES){
  for (i=0; i < NPAR; i++) P[i][i]=1;
  trc = 0.0;
}

k++;
if (k == NPT) k = 0;      /* Reinitialize parameter*/

/* calculate execution time */
exec_time = time_elapsed(TMR0, count0);
/* end of interrupt service routine */
end_isr_t0();
}

```


Marco Antonio de O. Alves Jr. - Observador neural
DMC/FEM/UNICAMP

```

*****/

#include <brtenv.h>          /* basic real-time environment */
#include <math.h>           /* Math function */
#include "matrix.h"
#include "Matcreat.c"
#include "Materr.c"
#include "lawrst.c"
#include "sch2k.h"
#include "W1.h"
#include "W2.h"
#include "W3.h"

#define CHANNELS 3          /* channel's number macro */
#define NPT 4096
#define DT 2.083333E-3
#define INPUT(u) { ds2003_start(DS2003_1_BASE); ds2003(DS2003_1_BASE,u);}
#define OUTPUT(y, chh) ds2101(DS2101_1_BASE, chh, y)
#define TMRO 0
#define TURN 0
#define MAX_SWP 33         /* Maximum Sweep Amplitude */

long chn[CHANNELS] = {1,2,3};
long rng[CHANNELS] = {DS2003_RNG_10,DS2003_RNG_10,DS2003_RNG_10};
long res[CHANNELS] = {DS2003_RES_16,DS2003_RES_16,DS2003_RES_16};
float mm[CHANNELS];
float sig, y, y1, z, r, u;
float *turn = (float *) (DP_MEM_BASE);

```

```

double nout, v, ynet;
double dr[length_A][1] = {1, 0.57306, 0.26117, 0.021518, 4.8e-17};
double nr[length_B][1] = {42.9059, -206.1321, 290.0958, -128.1045};
double YV[15][1], YN[50][1];
double Y11[length_A+1][1], R1[length_A][1];
int i, j;
int b1 = 0, b2 = 0, b3 = 0, k = 0;
MATRIX U1, R, S;

float exec_time;                /* execution time */
unsigned long count0;           /* timer0 time count */

/* error flag for CHKERR at last dual-port memory location */
volatile int *error = (int *) (DP_MEM_BASE + DP_MEM_SIZE - 1);

void isr_t0()                   /* timer0 interrupt service routine */
{
    begin_isr_t0(*error);        /* overload check */
    service_trace();             /* call TRACE service (TRACE < Vs 3.1) */
    service_mtrace("0");        /* call TRACE service (TRACE >= Vs 3.1) */
    count0 = count_timer(TMRO); /* save current timer count */

    sig = sw2[k]/MAX_SWP;
    r   = 2*mm[0];               /*Control Law*/
    y   = 20*mm[1];
    z   = mm[2];                 /*Input*/

    /*ADC Board*/
    INPUT(mm);

```

```

/*DAC Board*/
OUTPUT(sig,1);
if(*turn==1) OUTPUT(u,2);

    /* RST -> Control Law */
for (i = 0; i<length_A; i++){
    if(U[i][0]<=-1e12 | U[i][0]>=1e12){U[i][0] = 1e3;}
U1[i+1][0] = U[i][0];
}

lawrst(R, S, RR, Y, U1);
for (i = 0; i<length_A; i++){
    U[i][0] = -1e-3*U1[i][0];
    if(*turn==1) U[i][0] = -z;
}
u=U[0][0];

/* Buffer Generation Y*/
for (i = 0; i<length_A; i++) Y11[i+1][0] = Y[i][0];
Y11[0][0] = y;
Y11[2][0] = y;
for (i = 0; i<length_A; i++) Y[i][0] = Y11[i][0];

/* Buffer Generation R*/
for (i = 0; i<length_B; i++) R1[i+1][0] = RR[i][0];
R1[0][0] = r;
for (i = 0; i<length_B; i++) RR[i][0] = R1[i][0];

/***** Neural Output *****/

```

```

for (i = 0; i < 50; i++){
    v = 0.;
    for (j = 0; j < length_A+1; j++){
        if (j == 0) v += w1[i][j]*b1;
        else      v += w1[i][j]*Y[j-1][0];
    }
    YN[i][0] = tanh(v);
}

```

```

for (i = 0; i < 15; i++){
    v = 0.;
    for (j = 0; j < 51; j++){
        if (j == 0) v += w2[i][j]*b2;
        else      v += w2[i][j]*YN[j-1][0];
    }
    YV[i][0] = tanh(v);
}

```

```

nout = 0.;
for (j = 0; j < 16; j++){
    if (j == 0) nout += w3[0][j]*b3;
    else      nout += w3[0][j]*YV[j-1][0];
}

```

```

ynet = 20*nout;

```

```

/*****

```

```

k++;
if (k == NPT) k = 0;      /* Reinitialize parameter*/

```

```
    exec_time = time_elapsed(TMRO, count0); /* calculate execution time */
    end_isr_t0();                          /* end of interrupt service routine */
}

void main()
{

    /*Matrix Generation*/
    Y      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
    U1     = mat_creat(length_A+1, 1, ZERO_MATRIX);
    U      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
    RR     = mat_creat(length_B, 1, ZERO_MATRIX);
    R      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
    S      = mat_creat(length_B, 1, ZERO_MATRIX);

    for (i = 0; i < length_A; i++) R[i][0] = dr[i][0];
    for (i = 0; i < length_B; i++) S[i][0] = nr[i][0];

    *turn = TURN;

    init();
    ds2003_init(DS2003_1_BASE, CHANNELS, chn, rng, res);

    *error = NO_ERROR; /* initialize error flag */

    start_isr_t0(DT); /* initialize sampling clock timer */

    while (*error == NO_ERROR) /* background process */
        service_cockpit(); /* call COCKPIT code */
}
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

/***** poli.C *****/

```

```

    Marco Antonio de O. Alves Jr. - Controle Polinomial
    DMC/FEM/UNICAMP

```

```

*****/

```

```

#include <brtenv.h>          /* basic real-time environment */
#include <math.h>           /* Math function */
#include "matrix.h"
#include "matcreat.c"
#include "materr.c"
#include "lawrst.c"
#include "resid.c"
#include "sch2k.h"

#define length_A 5
#define length_B 4
#define length_AM 5
#define length_BM 5
#define length_AN 5
#define length_BN 4
#define RES 20e4
#define CHANNELS 3          /* channel's number macro */
#define NPT 4096
#define DT 0.25E-3
#define INPUT(u) { ds2003_start(DS2003_1_BASE); ds2003(DS2003_1_BASE,u);}
#define OUTPUT(y, chh) ds2101(DS2101_1_BASE, chh, y)
#define TMRO 0
#define TURN 0

```



```

/* error flag for CHKERR at last dual-port memory location */
volatile int *error = (int *) (DP_MEM_BASE + DP_MEM_SIZE - 1);

void isr_t0() /* timer0 interrupt service routine */
{
    begin_isr_t0(*error); /* overload check */
    service_trace(); /* call TRACE service (TRACE < Vs 3.1) */
    service_mtrace("0"); /* call TRACE service (TRACE >= Vs 3.1) */
    count0 = count_timer(TMRO); /* save current timer count */

    sig = sw2[k]/MAX_SWP;
    r = mm[0]; /* Control Law */
    y = mm[1]; /* Output */
    y1 = 20*y; /* Trace regulated measure */
    z = mm[2]; /* Input */

    INPUT(mm);
    OUTPUT(sig,1);
    if(*turn==1) OUTPUT(u,2);

    /* RST -> Control Law */
    for (i = 0; i<length_A; i++){
        if(U[i][0]<=-1e12 | U[i][0]>=1e12){U[i][0] = 1e3;}
        U1[i+1][0] = U[i][0];
    }

    lawrst(R, S, T, RR, Y, U1);
    for (i = 0; i<length_A; i++){
        U[i][0] = -0.9e-7*U1[i][0];
        if(*turn==1) U[i][0] = -z;
    }
}

```

```
}  
u=U[0][0];  
  
/* Residue */  
res1 = resid(BM, AM, RESID, Y, length_BM, length_AM);  
res2 = resid(BM, AM, RESID, U, length_BM, length_AM);  
res3 = y1 - r;  
  
/* Buffer Generation RES*/  
for (i = 0; i<length_AM; i++) RES1[i+1][0] = RESID[i][0];  
RES1[0][0] = res3;  
for (i = 0; i<length_AM; i++) RESID[i][0] = RES1[i][0];  
  
/* Norm Generation RES */  
resi = sqrt(res3*res3)/length_AM;  
  
/* Threshold */  
jth = resid(BM, AM, RESID, U, length_BM, length_AM);  
JTH = sqrt(jth*jth)/2 + 180e-3;  
  
/* Buffer Generation Y*/  
for (i = 0; i<length_A; i++) Y1[i+1][0] = Y[i][0];  
Y1[0][0] = y1;  
for (i = 0; i<length_A; i++) Y[i][0] = Y1[i][0];  
  
/* Buffer Generation R*/  
for (i = 0; i<length_B; i++) R1[i+1][0] = RR[i][0];  
R1[0][0] = z;  
for (i = 0; i<length_B; i++) RR[i][0] = R1[i][0];
```

```
k++;
if (k == NPT) k = 0;      /* Reinitialize parameter*/

exec_time = time_elapsed(TMRO, count0); /* calculate execution time */
end_isr_t0();             /* end of interrupt service routine */
}

void main()
{

/*Matrix Generation*/
Y      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
Y1     = mat_creat(length_A+1, 1, ZERO_MATRIX);
U      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
U1     = mat_creat(length_A+1, 1, ZERO_MATRIX);
RR     = mat_creat(length_B, 1, ZERO_MATRIX);
R1     = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
R      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
S      = mat_creat(length_B, 1, ZERO_MATRIX);
T      = mat_creat(length_A, 1, ZERO_MATRIX);
RES1   = mat_creat(length_AM+1, 1, ZERO_MATRIX);
RESID  = mat_creat(length_AM, 1, ZERO_MATRIX);
AM     = mat_creat(length_AM, 1, ZERO_MATRIX);
BM     = mat_creat(length_BM, 1, ZERO_MATRIX);
BN     = mat_creat(length_BN, 1, ZERO_MATRIX);

/* T = 1e-3
T[0][0] = 1.1146E5;
*/

/* T = 0.25e-3 */
```

```
T[0][0] = 2.8419E7;

for (i = 0; i < length_A; i++) R[i][0] = dr[i][0];
for (i = 0; i < length_B; i++) S[i][0] = nr[i][0];
for(i=0; i<length_AM; i++) AM[i][0]=am[i][0];
for(i=0; i<length_BM; i++) BM[i][0]=bm[i][0];
for(i=0; i<length_BN; i++) BN[i][0]=bn[i][0];

*turn = TURN;

init();
ds2003_init(DS2003_1_BASE,CHANNELS,chn,rng,res);

*error = NO_ERROR;           /* initialize error flag */

start_isr_t0(DT);           /* initialize sampling clock timer */

while (*error == NO_ERROR)  /* background process */
    service_cockpit();      /* call COCKPIT code */
}
```

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE