



IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS UTILIZANDO UM SISTEMA DE PREVISÃO INTELIGENTE

Hiran de Melo

Universidade Federal da Paraíba – Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Eng. Elétrica - Av. Aprígio Veloso, 882
58109-970 Campina Grande – PB, e-mail:

José Felício da Silva

Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia
Departamento de Tecnologia Mecânica – Campus Universitário, s/n
58059-900 João Pessoa – PB, e-mail: felicio@funape.ufpb.br

José Homero Feitosa Cavalcanti

Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia
Departamento de Tecnologia Mecânica – Campus Universitário, s/n
58059-900 João Pessoa – PB, e-mail: zevhom@uol.com.br

Resumo. *Neste trabalho apresentam-se resultados experimentais e a análise dos dados obtidos a partir da vibração de uma viga em balanço com um peso (massa extra) acoplado em diferentes pontos da mesma. Os dados experimentais obtidos podem representar falhas estruturais na viga.*

Palavras-chave: *Análise de Vibrações, Falhas em Vigas, Previsão, Rede Neural Artificial.*

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, os autores deste trabalho apresentaram em Porto Alegre (RS) no INDUSCON'2000 um trabalho que descreve o protótipo de um sistema detetor de vibrações (Melo et al, 2000) juntamente com alguns resultados experimentais obtidos utilizando um Sistema portátil para Aquisição Inteligente de Vibrações (SAIV).

Neste trabalho, utilizando o SAIV, apresentam-se resultados experimentais e a análise dos dados obtidos da vibração de uma viga em balanço com um peso (massa extra) acoplado em diferentes pontos da mesma, o que permitiu simular vários níveis de falhas estruturais controláveis, simulando a modificações da rigidez da estrutura mediante o deslocamento de uma massa extra. Durante os experimentos, o manipulador robótico percutia a viga (impulso) na sua extremidade livre. Utilizou-se um Sistema de Previsão Inteligente (SPI) para a análise dos dados. Será mostrado que este sistema possibilita a monitorização da estrutura, dando subsídios para elaboração de um programa de

manutenção preditiva, baseado nas séries temporais obtidas experimentalmente, visando evitar danos irreversíveis a estrutura. A eficiência da metodologia empregada será analisada utilizando gráficos que comparam as saídas desejadas ou alvos (teóricos) e saídas generalizadas obtidas através do SPI.

3. DESCRIÇÃO DO SAIV

O SAIV (Sistema portátil para Aquisição Inteligente de Vibrações) foi desenvolvido para a geração, obtenção e análise das vibrações em vigas em balanço (“cantilever beam”) [Rao, 1995] utilizando dois manipuladores robóticos (ver Apêndice A). Um dos manipuladores robóticos foi utilizado para a percussão da viga em balanço. O outro para posicionar um sistema de detecção de vibrações. O sistema de detecção de vibrações foi construído a partir de um mouse padrão conectado à interface paralela do microcomputador via uma placa de circuito analógico.

A foto da estrutura mecânica utilizada no SAIV é mostrada na Fig. (1). Na parte superior da Fig. (1) pode-se observar a placa do circuito elétrico utilizado para acionar o motor de passo (cilindro à esquerda da Fig. (1)) que move o dedo estilizado que percussiona a viga simplesmente engastada (a viga sofre um deslocamento da sua posição de equilíbrio estático e em seguida é liberada). A partir do centro e para a direita pode-se observar a viga de comprimento igual a 18 cm. Na extremidade esquerda da viga está acoplado o sensor de posição que utiliza a mecânica do mouse (esfera sensora e transdutores óticos) do microcomputador. Sobre a viga existe uma massa extra (um ímã na forma de um semi círculo) localizada a 4 cm da extremidade livre. No experimento esta massa extra é deslocada sucessivamente a partir da posição localizada a 2 cm para um nova posição, por incremento igual a 1 cm, até atingir 15cm da extremidade livre (totalizando 14 posições).

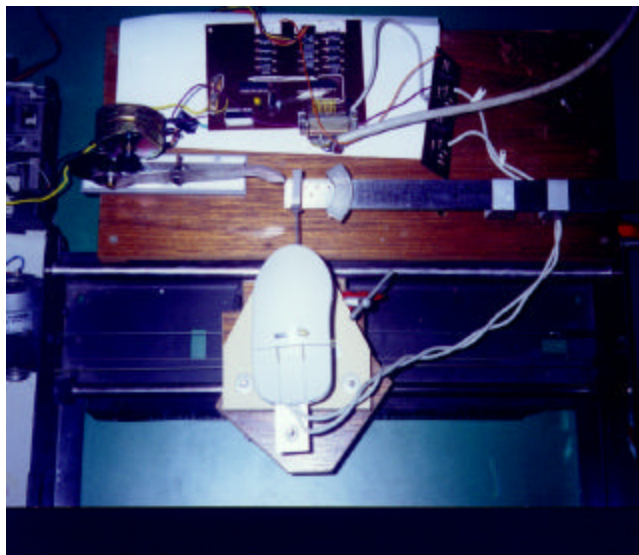


Figura 1. Fotografia da Planta de Aquisição de Dados.

A aquisição de dados obtidos da percussão da viga é feita oito vezes em cada posição em que se encontra a massa extra. Isto possibilita a escolha para análise do melhor conjunto dos dados adquiridos. Observou-se que a vibração da viga ocorre num tempo de duração inferior a 1s. Isto é, após alguns ciclos o sistema encontra o seu estado de equilíbrio estático. A partir de observações experimentais decidiu-se adquirir 64 amostras do sinal vibratório a uma taxa de uma amostra a cada 10 ms (o que equivale a uma frequência de amostragem igual 100 amostras/s). Tal escolha resultou em um tempo total de aquisição dos dados igual a 0,64 s.

A cada posição da massa extra sobre a viga são realizadas 8 oitenta repetições do experimento e como existem 14 posições a serem investigadas, tem-se no total 112 (8X14) registros de dados das vibrações. Cada registro contém 64 amostras da vibração da estrutura. Pode-se traçar um gráfico para cada registro em função do tempo. O gráfico do registro no domínio do tempo denomina-se de sinal discreto ou série temporal. Como cada grupo de 8 registros está relacionado a um mesmo experimento (correspondente a uma dada posição da massa extra), escolheu-se representar cada grupo por um sinal médio obtido pela média dos 8 sinais que constituem o grupo. A partir deste sinal médio estima-se a frequência de vibração do sistema.

A idéia subjacente a esta investigação é que o deslocamento da massa extra sobre a viga corresponde à variação de um parâmetro físico da viga (rigidez). Sabe-se que a variação na rigidez de uma viga simplesmente engastada corresponde a uma variação na frequência natural de vibração. Portanto, o deslocamento da massa extra sobre a viga corresponde também à variação da frequência natural de vibração da viga, o que implica que com o deslocamento da massa extra sobre a viga pode-se representar a variação na rigidez da estrutura mecânica.

Supondo-se que uma específica mudança na rigidez da viga corresponda a uma falha na estrutura mecânica, conclui-se que o deslocamento de massa sobre a viga pode ser usado como uma estratégia de Identificação de Falhas em uma Estrutura Mecânica. Um passo à frente constitui-se a previsão destas falhas.

2. AQUISIÇÃO DE DADOS E PREPROCESSAMENTO

Na Fig. (2) são apresentados quatro dos oitos sinais discretos correspondentes aos registros do experimento realizado com a massa extra localizada a 2 cm da extremidade livre da Viga Simplesmente Engastada. Observe-se que os quatro gráficos são semelhantes. Esta semelhança por sua vez já era esperada uma vez que a repetição do experimento foi realizada aproximadamente nas mesmas condições. Os gráficos da Fig. (2) estão traçados como se fossem sinais analógicos, entretanto devido à natureza da aquisição por amostras, eles são de fato representações de sinais discretos em que os pontos adjacentes estão ligados mediante segmentos de retas. Esta forma de representação foi adotada porque ela permite mostrar a semelhança existente entre estes sinais.

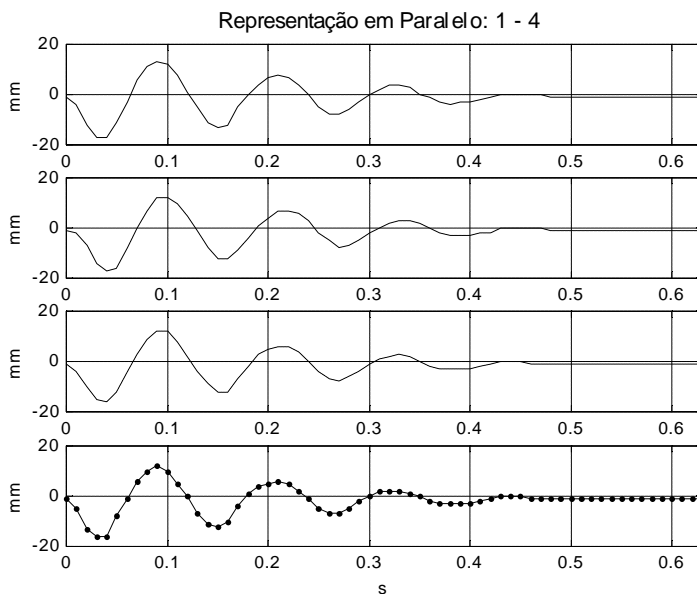


Figura.2 Vibrações de uma Viga com uma massa localizada a 2 cm da extremidade livre.

3. PREVISÃO DO SINAL MÉDIO DE VIBRAÇÃO

A seguir foram feitos experimentos variando a massa extra sobre a viga a partir da posição 3cm da extremidade livre até 10cm da extremidade livre. Foram feitos oito experimento (variação de 1cm) e os registros dos sinais obtidos foram utilizados para calcular um sinal médio para cada posição da massa extra sobre a viga. Na Fig. (3) apresenta-se o conjunto dos 8 sinais médios traçados da esquerda para a direita seguindo as oitos sucessivas posições que vão de 3cm a 10cm da extremidade livre.

Os sinais apresentados na Fig. (3) contém apenas as trinta primeiras amostras dos respectivos sinais médio e continuarão a ser denominados de sinais médios. A razão da redução do número de elementos do sinal médio deve-se ao excesso de redundância de informação contida em 64 amostras e a sensibilidade da rede neural multi camadas (RNMC) (Hummelhart, 1986) utilizada na previsão.

A partir de observações experimentais com o SAIV chegou-se a seguinte conclusão:

1) Quando a massa extra se desloca na direção da extremidade fixa observa-se que a rigidez aumenta, conseqüentemente verifica-se que a freqüência do sinal aumenta.

2) Quando a massa extra se desloca na direção da extremidade livre observa-se que a rigidez diminui, conseqüentemente verifica-se que a freqüência do sinal diminui.

3) Quando a massa extra se desloca na direção da extremidade fixa observa-se que o incremento no valor da freqüência vai sendo reduzido.

4) Quando a massa extra se desloca na direção da extremidade livre observa-se que o incremento negativo no valor da freqüência vai aumentando em valor absoluto.

Neste trabalho analisa-se o comportamento da estrutura na situação em que a massa extra desloca-se na direção da extremidade fixa.

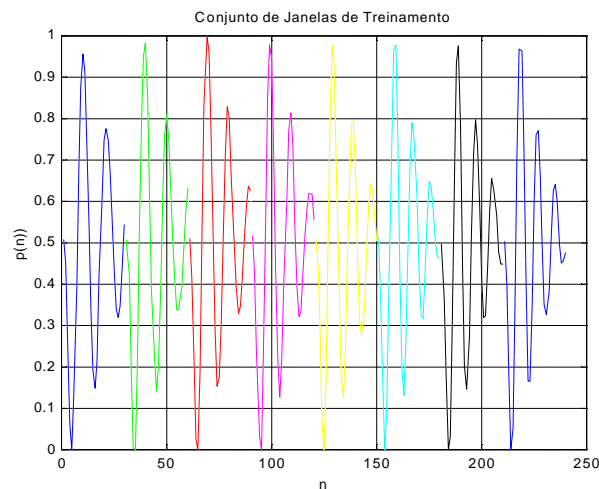


Figura.3 Conjunto de sinais médios obtidos de diferentes posições da massa.

Melo et al (1998) apresentou um trabalho em que uma RNMC era utilizada na previsão de séries temporais utilizando a representação em janelas. Na Fig. (4) apresenta-se o esquema geral do Sistema de Previsão Inteligente (SPI) utilizado na previsão de séries temporais. Neste trabalho os blocos do SPI relativos à Lógica Fuzzy, Algoritmo Genético e "Cluster" não foram utilizados.

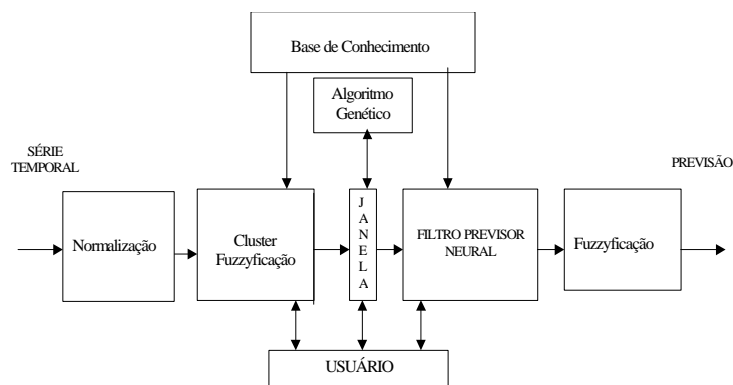


Figura 4. Esquema geral do SPI

No SPI os sinais médios são denominados de Janelas. Cada janela possui 30 amostras. Um grupo de Janelas utilizado no treinamento é denominado de Conjunto de Janelas de Treinamento (CJT). O CJT dos sinais médios possui 8 janelas numeradas de 1 a 8 e representada pela letra k . Baseado no trabalho de Melo et al (1999) utilizou-se uma RNMC com três camadas, com trinta neurônios lineares na camada de entrada, sessenta neurônios do tipo sigmóide na camada oculta, e trinta neurônios na camada de saída. No SPI a RNMC é preparada para aprendizagem tendo como entrada uma janela k (Janela Entrada) e como saída o alvo referente a janela $k+1$ (Janela Alvo). Neste trabalho a RNMC foi treinada com o CJT seguindo o esquema apresentado na tabela (1).

Tabela 1. Conjunto de treinamento da RNMC

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela 1	Janela 2
Janela 2	Janela 3
Janela 3	Janela 4
Janela 4	Janela 5
Janela 5	Janela 6
Janela 6	Janela 7
Janela 7	Janela 8

A seguir, a RNMC foi treinada com o CJT durante 1000 iterações utilizando o Algoritmo de Retropropagação do erro. O erro foi definido como a diferença entre a saída da RNMC e a Janela Alvo respectiva.

A seguir foi feita a primeira previsão utilizando o esquema mostrado na Tabela (2). Observe-se que não há treinamento da RNMC. Na Tabela (2) definem-se novas janelas, denominadas Janela P_i , que são geradas na previsão da RNMC. Observe-se que P_1 foi prevista baseado no conhecimento de Janela 8.

Tabela 2. Previsão 1

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela 8	Janela P_1

Em seguida foi feita a segunda previsão utilizando o esquema mostrado na Tabela (3). Observe-se que Janela P_2 foi prevista baseado no conhecimento de Janela P_1 .

Tabela 3. Previsão 2

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela P_1	Janela P_2

Os resultados das previsões estão nos gráficos apresentados na Fig. (5). As janelas vermelhas representam os sinais obtidos durante o treinamento da RNMC, as janelas azuis representam a previsão da RNMC, e as janelas verdes representam os sinais obtidos experimentalmente. Na Fig. (6) apresenta-se um "zoom" das duas janelas obtidas na previsão (janela P1 e Janela P2, cor azul) junto com as janelas medidas (cor verde).

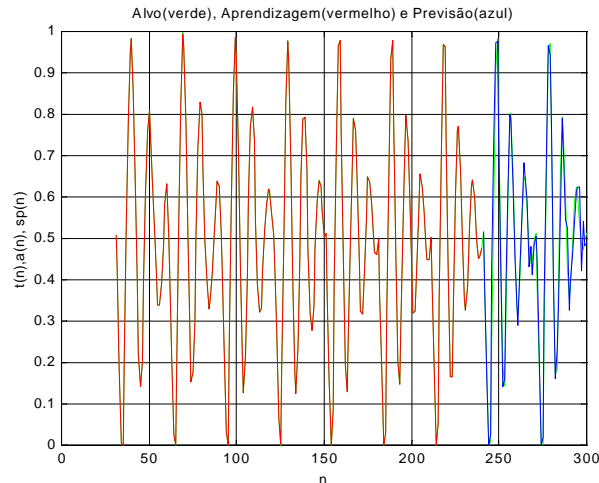


Figura.5 Janelas em vermelho, resultado da aprendizagem. Janelas em azul, previsão. Janelas em verde, sinal observado (medido).

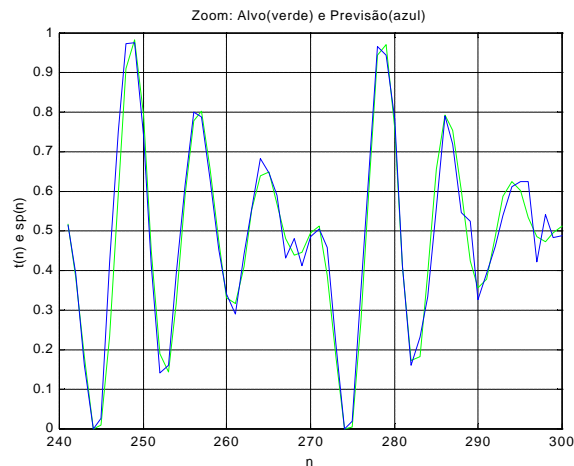


Figura.6 Zoom: janelas em azul, previsão; janelas em verde, sinal observado.

Observe-se que quanto mais a Janela P1 se assemelhar ao sinal efetivamente medido relativo a posição da massa extra localizada a 11cm espera-se que seja melhor a qualidade da previsão. Do mesmo modo, quanto mais a Janela P2 se assemelhar ao sinal ao sinal efetivamente medido relativo a posição da massa extra localizada a 12cm espera-se que seja melhor a qualidade da previsão.

4. PREVISÃO DA POSIÇÃO DA MASSA EXTRA SOBRE A VIGA

Na seção 3 apresentou-se como o SPI prevê as novas janelas do sinal que irão ocorrer durante o movimento da massa extra sobre a viga. Conhecendo-se as janelas do sinal que irão ocorrer podem-se utilizar esta informação para prever a posição da massa sobre a viga. Utilizando-se novamente o SPI e o CJT com a Janela Entrada da Tabela (1), mas modificando a Janela Alvo para valores discretos

correspondentes à posição da massa sobre a viga. Na Tabela (4) ilustra-se o CJT utilizado no treinamento da RNMC. Os resultados obtidos encontram-se na Fig. (6).

Tabela 4. Conjunto de treinamento da RNMC

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela 1	3cm
Janela 2	4cm
Janela 3	5cm
Janela 4	6cm
Janela 5	7cm
Janela 6	8cm
Janela 7	9cm
Janela 8	10cm

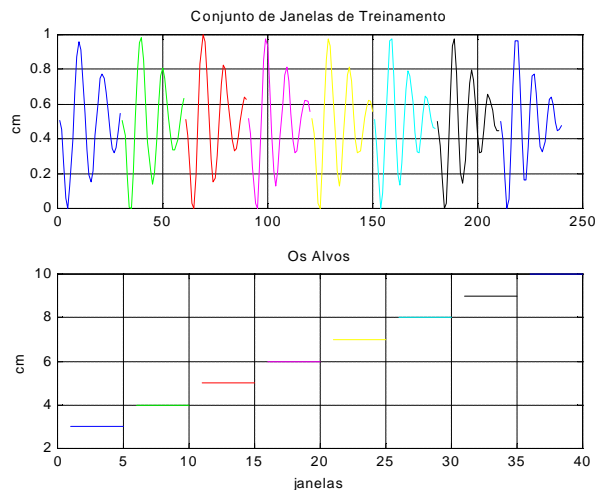


Figura.6 CJT para as posições da massa extra sobre a viga.

A seguir foi feita a primeira previsão utilizando a estratégia mostrada na Tabela (5). Observe-se que não há treinamento da RNMC. Na Tabela (5) aplica-se a janela P1 gerada na previsão quando da primeira aplicação do SPI. A seguir foi feita a previsão da posição na forma apresentada na Tabela (5) em que a RNMC apresentou o valor 10.7cm na sua saída (curva verde na Fig. (8)).

Tabela5. Primeira Previsão Relativa à Posição

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela P1	10.7cm

Novamente, foi feita a segunda previsão da posição utilizando-se da estratégia mostrada na Tabela (6) em que a RNMC apresentou o valor 11.6cm na sua saída (curva verde na Fig. (8)).

Tabela 6. Segunda Previsão Relativa à Posição

Janela Entrada	Janela Alvo
Janela P2	11.6cm

Na Fig. (8) apresentam-se os resultados do SPI aplicado como predictor de posição. Na cor vermelha tem-se a saída do SPI quando a entrada representa janela do sinal efetivamente medido. Na

cor verde tem-se a saída do SPI quando a entrada representa janela do sinal obtida por previsão. Na cor azul tem-se a posição alvo.

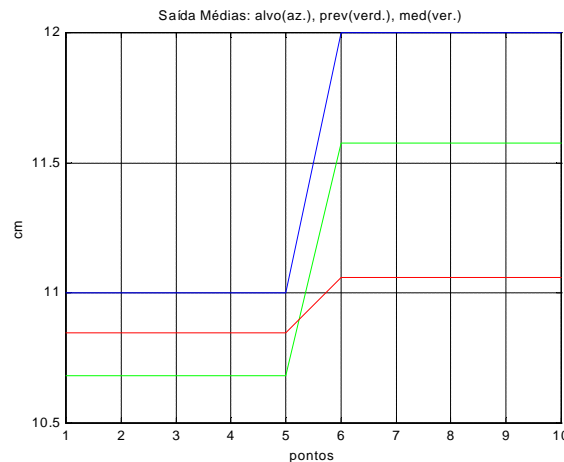


Figura.8 Saídas do SPI com entrada de previsão e com entrada do sinal medido.

5. CONCLUSÕES

A aplicação de previsor neural visando prever o deslocamento de posição de uma massa extra (que simula com o seu deslocamento mudanças na rigidez da estrutura mecânica) mostrou-se satisfatória. Observou-se que o uso do previsor neural leva a um resultado semelhante ao resultado que é obtido com uso de novas medições das vibrações. Este resultado se confirmado para estrutura mais complexa possibilitará a monitorização da estrutura, dando subsídios para elaboração de um programa de manutenção preditiva, baseado nas séries temporais obtidas experimentalmente, visando evitar danos irreversíveis a estrutura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Melo, Hiran de, Cavalcanti, José Homero Feitosa Cavalcanti e Silva, José Felício, "An Intelligent System for Vibrations Analysis", Induscon'2000, Porto Alegre, RG, 2000.
- Melo, Hiran de, Cavalcanti, José Homero Feitosa Cavalcanti, "Filtro Previsor Neural", XII Congresso Brasileiro de Automática, Anais, Vol. 1/6, pp. 319-324. – 1998.
- Melo, Hiran de, Cavalcanti, José Homero Feitosa Cavalcanti, "Sistema de Previsão Inteligente", XII Congresso Brasileiro de Automática, Anais, Vol. 1/6, pp. 319-324. – 1998.
- Rao, Singiresu. S., "Mechanical Vibrations" – Addison Wesley Publishing Company, Inc. – 1995.
- Humelhart, D.E. e Hinton, G.E. & Williams, R.J. 1986, "Learning Internal Representations by Error Propagation", Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition". Vol 1, D.E. Humelhart & J.L. McClelland, Cambridge, MA: MIT Press, pp. 318-362.

APÊNDICE A

O SAIV é representado na forma de esquema na Fig. (9). Nesta figura o bloco FONTE DE VIBRAÇÕES representa as vibrações geradas por um manipulador robótico; o bloco PLANTA representa uma viga em balanço; o bloco DETECTOR DE VIBRAÇÃO representa um "serial mouse" fabricado pela Chuang Feng Electronics Ltd. (modelo HK – 97) montado sobre uma esfera

amplificadora ligada à viga em balanço de modo a transferir para a esfera do mouse a energia de vibração – constituindo-se o sistema sensor de vibração; e o bloco ANÁLISE INTELIGENTE que representa a análise dos dados efetuada num microcomputador padrão tipo PC utilizando séries de Fourier e técnicas de inteligência artificial.

Durante os experimentos o manipulador gerador de vibração (GV) percute a extremidade da viga em intervalos regulares. As vibrações são adquiridas pelo microcomputador utilizando o mouse HK – 97 ou similar. Não existe, em princípio, a necessidade de utilização de um mouse dedicado.

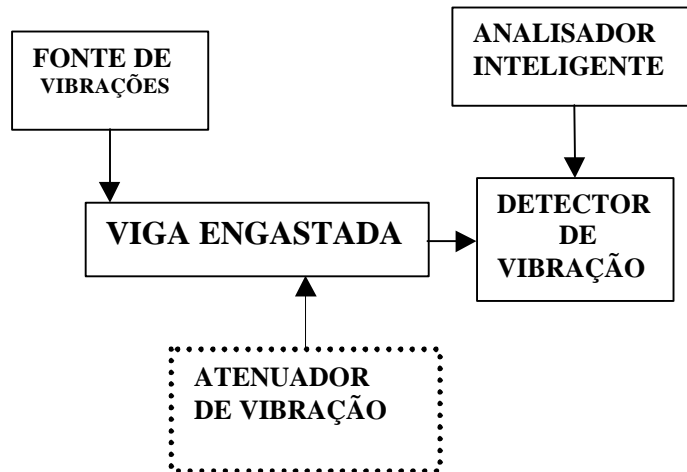


Figura 9. Esquema geral do SAIV

Na Fig. (10) apresenta-se o esquema geral da montagem do SAIV. Nela são apresentados detalhes do acoplamento da haste metálica ao sistema do mouse do SAIV. Observe-se que a esfera acoplada à haste está sob a esfera do mouse. A esfera da haste possui diâmetro maior que a esfera do mouse possibilitando a amplificação das oscilações.

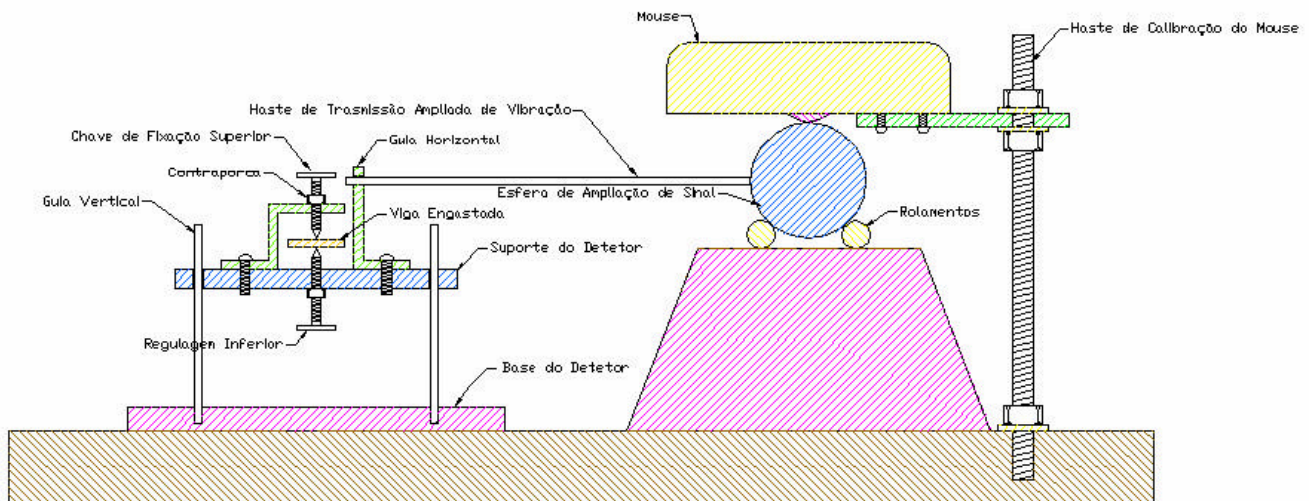


Figura 10. Protótipo do Detector de Vibração.

Na Fig.11 apresenta-se o manipulador robótico, denominado GV, utilizado para a geração das vibrações. O GV foi construído a partir da observação de como o operador gera vibrações numa régua metálica em balanço utilizando o seu dedo. O GV foi construído acoplando-se o “dedo estilizado” a uma roda fixa no eixo do motor de passo formando uma biela. Quando o motor de passo gira, o dedo

estilizado, próximo à haste acoplada ao mouse, movimentada-se para cima e para baixo, para trás e para frente, de uma forma elíptica, batendo de raspão na ponta livre da viga em balanço gerando uma vibração na mesma.

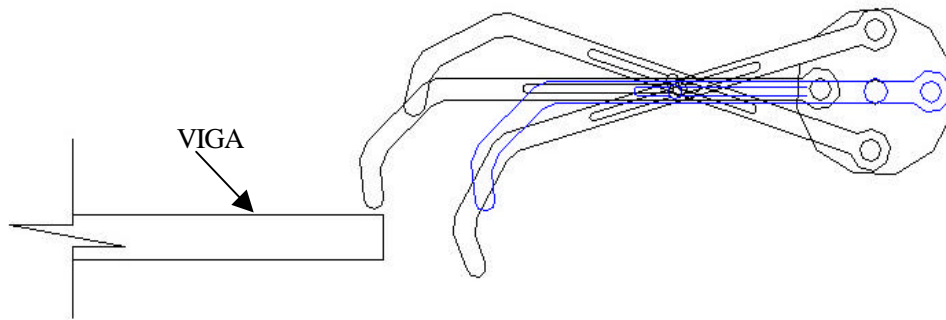


Figura 11 - O manipulador GV

STRUCTURAL FAULTS IDENTIFICATION USING A INTELLIGENT FORECASTING SYSTEM

Hiran de Melo

Federal University of Paraíba
Departmente of Engineering Electric
58109-970 Campina Grande – PB, e-mail: hiran@dee.ufpb.br

José Felício da Silva

Federal University of Paraíba
Departmente of Engineering Mechanic
58059-900 João Pessoa – PB, e-mail: felicio@funape.ufpb.br

José Homero Feitosa Cavalcanti

Federal University of Paraíba
Departmente of Engineering Mechanic
58059-900 João Pessoa – PB, e-mail: zevhom@uol.com.br

Abstract. *This paper presents the design details, results and data analysis obtained from a cantilever beam with a load coupled at different locations. The data obtained may represent beam structural faults.*

Key-words: *Vibration Analyse, Beam Faults, Forecasting, Artificial Neural Networks.*