



CONTROLE ATIVO DE VIBRAÇÃO, POR REALIMENTAÇÃO, COM ATUADOR PIEZOELÉTRICO - EFEITOS DA VELOCIDADE DO CIRCUITO DE POTÊNCIA

Simplicio Arnaud da Silva

Seyyed Said Dana

Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Tecnologia Mecânica - Campus I
58059-900, João Pessoa, Paraíba, Brasil

Resumo. Neste trabalho é apresentada uma técnica de controle ativo para a redução da vibração de uma placa retangular de alumínio em um duto. Uma malha de realimentação com circuitos eletrônicos analógicos é utilizada para fornecer o sinal elétrico necessário ao cancelamento da vibração da placa. O sinal de referência utilizado pelo controlador para alimentar a lâmina piezoelétrica (atuador), que está colada na placa, é gerado por uma lâmina piezoelétrica (sensor), que encontra-se colado na mesma placa. Como o desempenho do sistema de controle está relacionado com a velocidade dos componentes eletrônicos, é feita também, uma comparação dos resultados obtidos com a utilização de amplificadores de potência de diferentes velocidades.

Palavras-Chave: Controle ativo, Controle de vibração, Piezoelétrico.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente, o mecanismo de controle ativo de transmissão de ruído tem sido estudado intensivamente, por causa do interesse em aplicações para redução dos níveis de ruído no interior de aviões e carros. O uso de materiais piezoelétricos como atuadores (ou sensores), embutidos ou colados em superfícies de estruturas, tem despertado grande interesse para os pesquisadores. A particularidade das lâminas piezoelétricas é devida ao fato destas apresentarem uma característica distribuída e alta resolução de deslocamento. Além disso, as lâminas piezoelétricas são baratas, leves e são facilmente coladas ou embutidas.

Recentes estudos realizados por Dimitriadis & Fuller (1989) e Wang et al.(1990) têm sido dedicados ao controle da radiação sonora utilizando atuadores piezoelétricos. Fuller et al. (1989,1990), demonstraram analítica e experimentalmente que a aplicação de forças externas em estruturas podem reduzir a radiação sonora, e que para este tipo de aplicação, os atuadores piezoelétricos são os mais indicados, principalmente em estruturas leves. Os autores também fizeram um estudo experimental para o controle de radiação sonora numa placa simplesmente apoiada com um único atuador piezoelétrico como entrada de controle. Neste estudo, o controle do campo sonoro remoto foi alcançado por supressão nodal. Wang et al.(1989,1990), desenvolveram um modelo analítico que considera o controle ativo de

radiação sonora de múltiplos atuadores piezoelétricos como fontes secundárias. A entrada da fonte primária é constituída de uma força aplicada à estrutura. O controle global da radiação sonora foi alcançado com elementos piezoelétricos empregados como atuadores distribuídos.

A aplicação de atuadores distribuídos para o controle de radiação sonora através de placas finas foi considerada analiticamente por Dimitriadis et al.(1989,1991). Os autores derivaram as equações para estruturas bidimensionais, com o uso de atuadores piezoelétricos, e demonstraram que estes podem excitar modos selecionados de vibração na faixa de frequência de trabalho quando usados de forma distribuída. Dimitriadis et al.(1989), demonstraram também analiticamente que um único elemento piezoelétrico pode produzir alta atenuação de transmissão sonora através de placas circulares engastadas.

Nierkerk et al.(1995), desenvolveram um trabalho teórico e experimental de controle de ruído de uma placa circular em um duto. Os autores desenvolveram uma metodologia geral de projeto que utiliza controladores digitais de alimentação direta e inversa num único estado dinâmico. Uma redução de 20 dB no primeiro modo de vibração (1 kHz) foi obtida.

Recentemente Silva et al. (1997, 1998), publicaram trabalhos experimentais de controle ativo de vibração em placas de alumínio. Eles utilizaram uma montagem com duas placas engastadas. O sinal para o cancelamento da vibração da segunda placa foi gerado por um sensor piezoelétrico colado na primeira placa.

Neste trabalho usa-se apenas uma placa no lugar das duas utilizadas nos trabalhos anteriores, Silva et al. (1997, 1998), pois apenas a malha de realimentação se faz presente.

2. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

Com o avanço da tecnologia dos semicondutores, os amplificadores de potência, atualmente são capazes de amplificar sinais de frequência muito acima da frequência de áudio sem qualquer distorção.

Um amplificador ideal amplifica igualmente qualquer sinal de entrada. Porém, devido a presença dos circuitos de compensação, nos amplificadores reais, o ganho diminui com o aumento da frequência. O valor da frequência na qual o ganho do amplificador torna-se unitário é chamado de *banda passante* de ganho unitário.

Outro parâmetro que reflete a capacidade dos amplificadores, com sinais variantes no tempo é a *taxa de subida* TS , definida como:

$$TS = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \quad (1)$$

A *taxa de subida* fornece um parâmetro que especifica a máxima taxa de variação da tensão de saída ΔV_o , num intervalo de tempo Δt , para uma entrada na forma de degrau. Se for aplicado um sinal na entrada do amplificador, com uma taxa de variação de tensão maior que a *taxa de subida*, a saída não será capaz de variar suficientemente rápido, resultando num sinal distorcido.

A máxima frequência de sinal em que um amplificador pode operar depende da *banda passante* e da *taxa de subida*. Para um sinal senoidal de amplitude K , a máxima frequência de sinal a ser amplificada, sem haver distorção é dada por:

$$f = \frac{TS}{2\pi K} \quad (2)$$

No controle ativo de vibrações, com atuadores piezoelétricos utiliza-se uma tensão elétrica alternada, para produzir o momento necessário, na estrutura vibrante. Esta tensão é fornecida por um amplificador de potência, que usa na entrada, um sinal de referência, associada com a vibração da estrutura.

Quando este sinal é estacionário (amplitude e frequência fixas), com uma frequência inferior a *banda passante* do amplificador é assegurada a amplificação sem distorção. Entretanto, nos transitórios, a eficiência do sistema de controle depende da rapidez da correção. Isto sugere que, amplificadores com taxas de subida maiores são mais eficientes nos transitórios.

3. IDENTIFICAÇÃO ANALÍTICA E NUMÉRICA DO PRIMEIRO MODO DE VIBRAÇÃO DA PLACA

Nesta simulação utilizou-se uma placa cujas dimensões foram as mesmas da utilizada no protótipo como mostra a “Tabela 1”.

Tabela 1. Características e dimensões da placa de alumínio.

Módulo e elasticidade	$6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Densidade	$2,7 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Comprimento	$1 \times 10^{-1} \text{ m}$
Largura	$8 \times 10^{-2} \text{ m}$
Espessura	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Fator de Poisson	0,3

Com o auxílio do programa computacional de elementos finitos Msc/Nastran, determinou-se o primeiro modo de vibração da placa. Para uma configuração de malha com 208 nós e 180 elementos obteve-se 1602 Hz.

Segundo Zhou et al. (1994a), a melhor localização do sensor ou atuador, quando se deseja estudar o primeiro modo, será o centro geométrico da placa.

Para o cálculo analítico da frequência natural do primeiro modo utilizou-se a “Eq. (3)”, (Szilard, 1974), obtendo-se 1707 Hz para o primeiro modo.

$$w = 3 \sqrt{\frac{7 \left(\frac{1}{a^4} + \frac{4}{7} \frac{1}{a^2 b^2} + \frac{1}{b^4} \right) Y h^3}{12 (1 - \nu^2)}} \quad (3)$$

onde ν é o fator de Poisson, Y é o módulo de elasticidade e h , a e b as dimensões da placa.

4. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA ESTRUTURA

4.1 Montagem do protótipo

Com o objetivo de medir a resposta em frequência experimental, realizou-se a montagem do protótipo. Como o estudo é restrito à faixa de frequência correspondente ao primeiro modo de vibração da placa, as frequências acima de 2 kHz não foram consideradas.

Uma lâmina piezoelétrica com as características mostradas na “Tabela 2”, foi colada no centro da placa de alumínio para transformar o sinal mecânico de vibração da placa em um sinal elétrico (sensor). A “Figura 1” mostra a montagem mecânica utilizada.

Tabela 2: Propriedades do material piezoelétrico (G1195).

Dimensões	20 x 25 mm
Módulo de elasticidade	$6,3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Densidade	$7,65 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Constante piezoelétrica	$1,66 \times 10^{-10} \text{ m/V}$

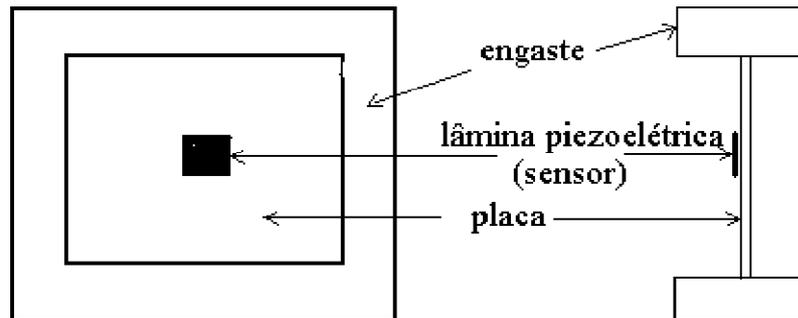


Figura 1: Vistas frontal e lateral da montagem.

4.2 Identificação experimental da frequência do primeiro modo

Como a resposta, em frequência experimental, de um sistema pode ser obtida através dos dados experimentais de entrada e saída, torna-se necessário que o sinal de entrada seja capaz de excitá-lo na faixa de frequência desejada (até 2000Hz). Neste caso, optou-se por um ensaio de impacto, pois a faixa de frequência de excitação depende apenas do tempo de aplicação da força. A “Figura 2” mostra a montagem utilizada.

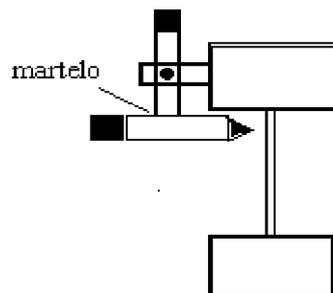


Figura 2. Montagem mecânica para a realização dos ensaios de impacto.

A “Figura 3” mostra o diagrama de blocos do sistema utilizado na identificação experimental.

O circuito que amplifica o sinal do sensor é um amplificador não inversor, com ganho variável máximo de 10, como mostra a “Fig. 4”.

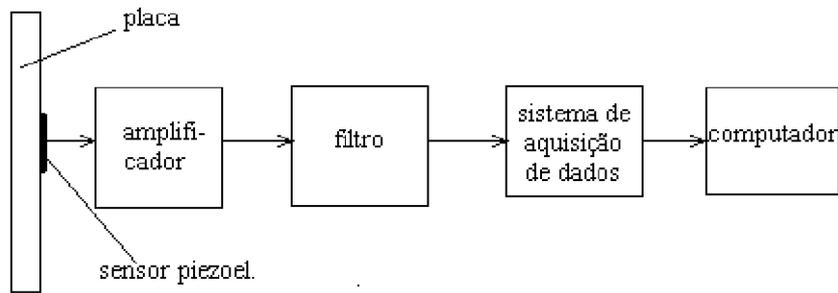


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de identificação experimental.

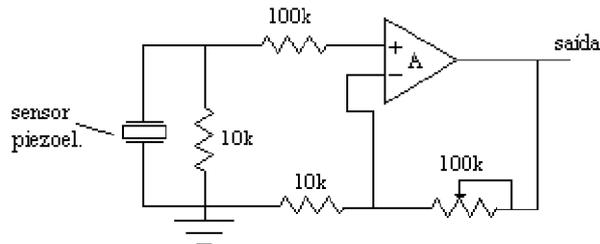


Figura 4. Amplificador não inversor.

A filtragem do sinal é feita com um filtro passa baixa (Butterworth) de oitava ordem, constituído de quatro estágios e uma frequência de corte de 2 kHz. Este filtro foi projetado e implementado no laboratório, utilizando-se amplificadores operacionais 741. As “Figuras 5 e 6” mostram o circuito elétrico do filtro e a curva de resposta em frequência, respectivamente.

O computador, com o auxílio de um sistema de aquisição de dados (daqbook100), armazena os dados para posterior processamento pelo programa computacional de processamento de sinais (SnapMaster).

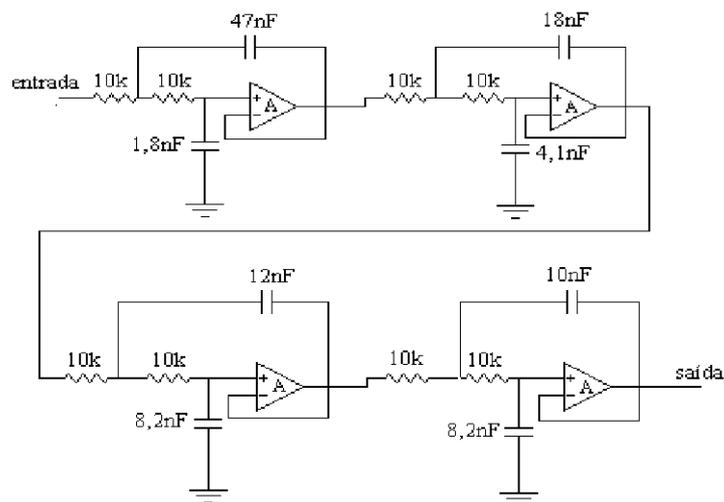


Figura 5. Filtro passa baixa de oitava ordem.

O martelo utilizado para produzir o impacto é equipado com um sensor piezoelétrico para converter o sinal da força em um sinal elétrico equivalente. A “Figura 7” mostra o diagrama esquemático do martelo juntamente com o sistema de medição.

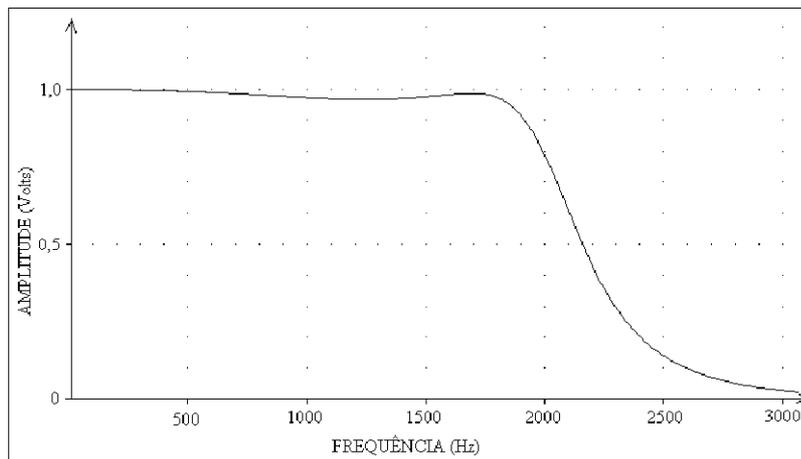


Figura 6. Curva de resposta em frequência do filtro passa baixa.

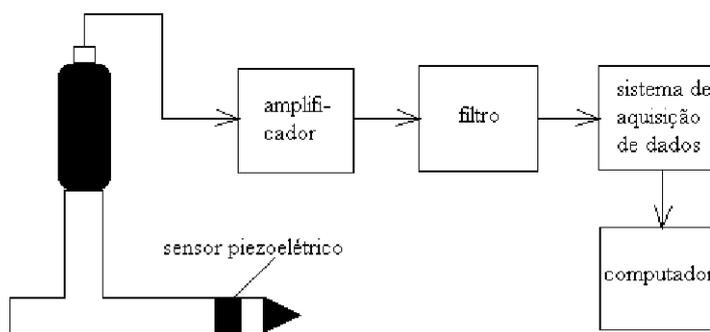


Figura 7. Diagrama esquemático do martelo e diagrama de blocos do circuito de medição.

No instante do impacto, o sinal elétrico gerado pelo sensor é captado por um segundo canal do sistema de aquisição de dados. Este mesmo sinal é utilizado como gatilho para inicializar o processo de coletas dos dados. Com isso, assegura-se o sincronismo entre o sinal de entrada (impacto) e o sinal de saída (vibração da estrutura).

A “Figura 8” mostra a resposta do martelo, no domínio do tempo e da frequência.

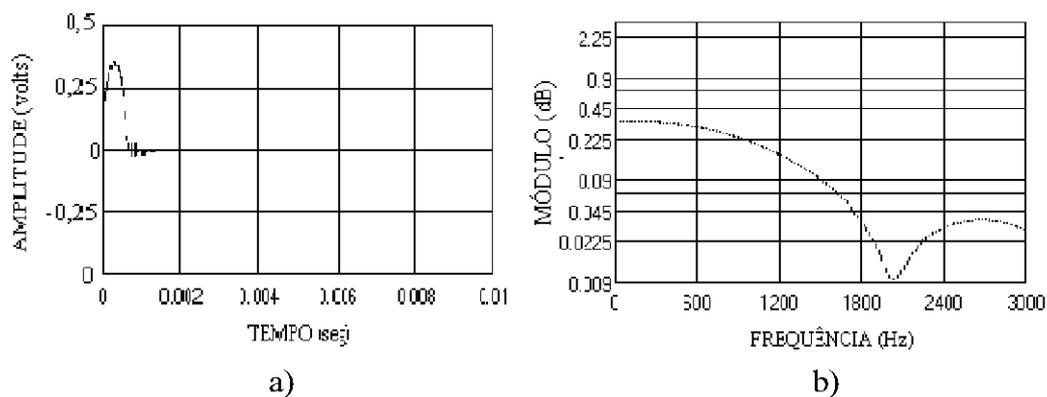


Figura 8. Resposta do martelo: a) no domínio do tempo; b) no domínio da frequência.

A faixa de frequência de excitação do ensaio de impacto é medida através da curva de resposta em frequência do martelo. Como mostra a “Fig. 8b”, a amplitude do sinal no

domínio da frequência sugere que, com esta montagem, o martelo é capaz de excitar a estrutura na faixa de frequência desejada (2 000 Hz).

A Transformada Rápida de Fourier (TRF) resultante do ensaio de impacto para a placa é mostrada na “Fig. 9”, na qual constatou-se uma frequência de 1538 Hz para o primeiro modo. Este resultado foi menor do que os obtidos pelos métodos anteriores (analítico e numérico). Isto justifica-se pelo fato de que o engaste na montagem experimental não é perfeito.

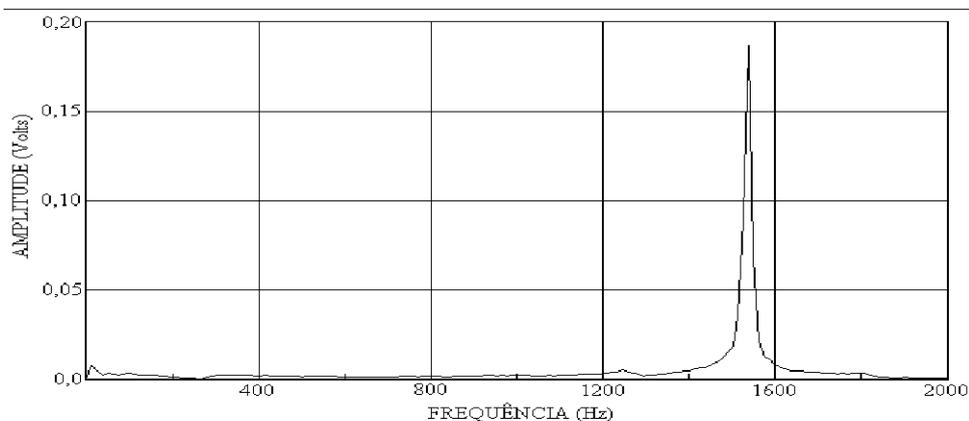


Figura 9. TRF da placa resultante do ensaio de impacto.

5. REALIZAÇÃO DO CONTROLADOR

A “Figura 10”, mostra uma vista em corte da montagem mecânica do sistema. O autofalante, quando alimentado por um sinal harmônico (senoidal) com uma frequência pré-determinada, gera um campo acústico que se propaga através do duto, produzindo vibrações na placa.

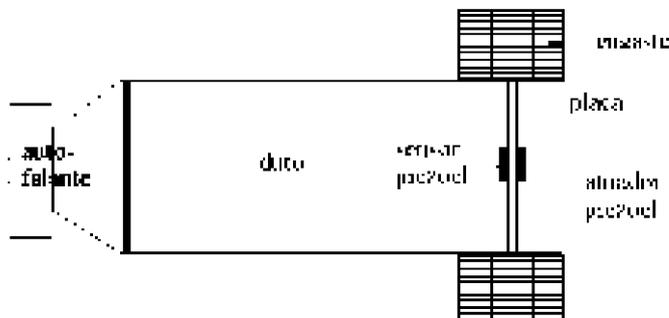


Figura 10. Vista em corte da montagem mecânica completa do sistema.

O objetivo do experimento é o de cancelar a vibração da placa. Para isso, torna-se necessário aplicar uma tensão elétrica no atuador piezoelétrico que se encontra colado a mesma. Excitado por esse sinal elétrico, o atuador piezoelétrico induz momentos opostos aos gerados na placa devido a vibração. Isto é alcançado quando o sinal de alimentação do atuador piezoelétrico é defasado com relação ao sinal de vibração da placa.

5.1 Diagrama de blocos do circuito de realimentação

A “Figura 11” mostra o diagrama de blocos do sistema com a realimentação.

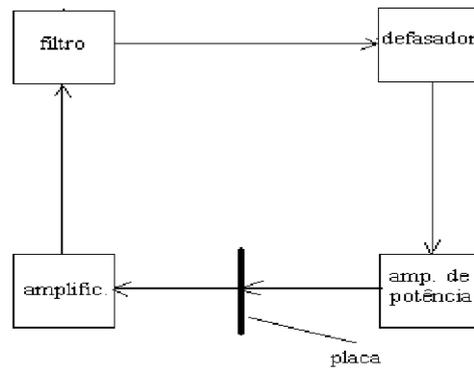


Figura 11. Diagrama de blocos do circuito de realimentação.

Como mostra a “Fig. 11”, o sinal gerado pelo sensor piezoelétrico, é amplificado e em seguida filtrado em 2000Hz. Depois de sofrer um deslocamento na fase pelo circuito defasador, este sinal é amplificado em tensão e corrente pelo amplificador de potência e, posteriormente, aplicado no atuador piezoelétrico.

Para efeito de comparação dos resultados utilizou-se dois amplificadores de potência com diferentes velocidades: O amplificador (1) é um amplificador de áudio, modelo AP 500 fabricado pela **polivox**, com um tempo de subida de $2 V/\mu s$, e o amplificador (2) é o modelo 3583 JM, fabricado pela **burr-brown**, com um tempo se subida de $10 V/\mu s$.

Para realizar os ajustes necessários, utilizou-se uma perturbação de origem acústica, gerada pelo autofalante, com uma frequência correspondente ao primeiro modo de vibração da placa (1538 Hz). Em seguida ajustou-se o ganho e a fase do controlador de forma a obter-se o menor nível de vibração da mesma para esta frequência. Mantendo esse ajuste inalterado, mediu-se a resposta no tempo com e sem controle. Os resultados foram idênticos para os dois amplificadores, com uma atenuação de 25 dB no nível de vibração da placa.

Para obtenção da resposta em frequência realizou-se também o ensaio de impacto (seção 4.2). Neste caso, o autofalante foi desligado e o sinal de excitação foi gerado pelo martelo com a malha de controle ligada (“Fig. 12”). Os resultados são mostrados na “Fig. 13”.

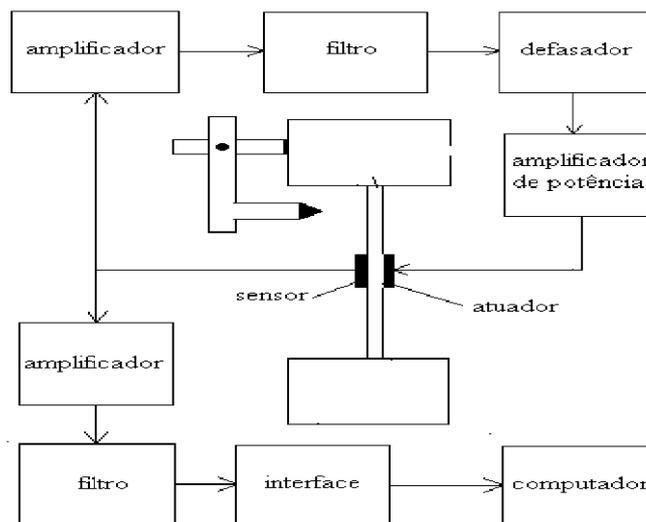


Figura 12. Montagem utilizada no ensaio de impacto com a malha de controle ligada.

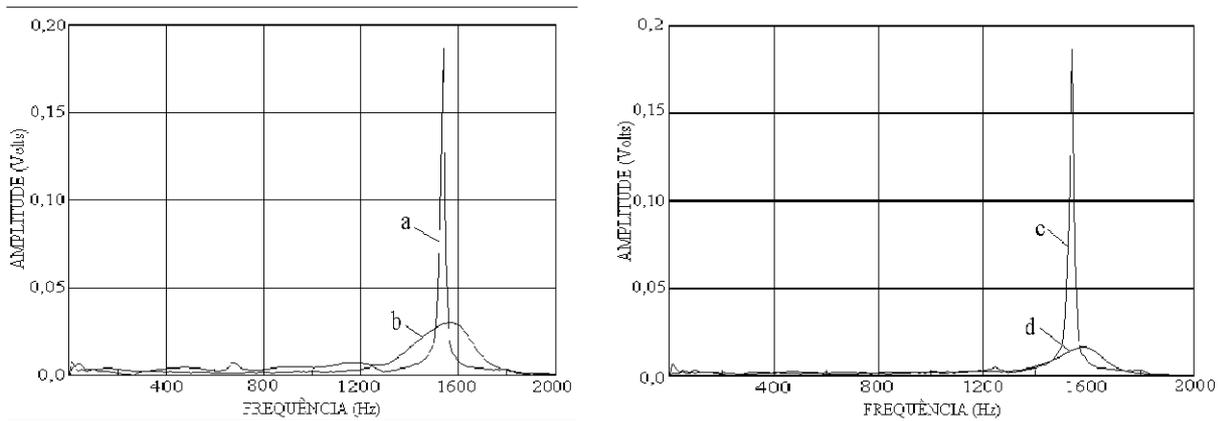


Figura 13. TRF da resposta ao impacto.

Na “Fig. 13”, as curvas **a** e **c**, representam a resposta do sistema em malha aberta e as curvas **b** e **d**, em malha fechada com o amplificador(1) e o amplificador(2), respectivamente.

Observando-se as curvas **b** e **d**, constata-se que o amplificador(2), produziu, na frequência natural (1538 Hz), um nível de atenuação maior do que o amplificador(1) (23 dB com o amplificador(2) contra 17 dB com o amplificador(1)).

As curvas no domínio do tempo do sistema em malha aberta e fechada, são mostradas respectivamente nas “Figs. 14a e b”.

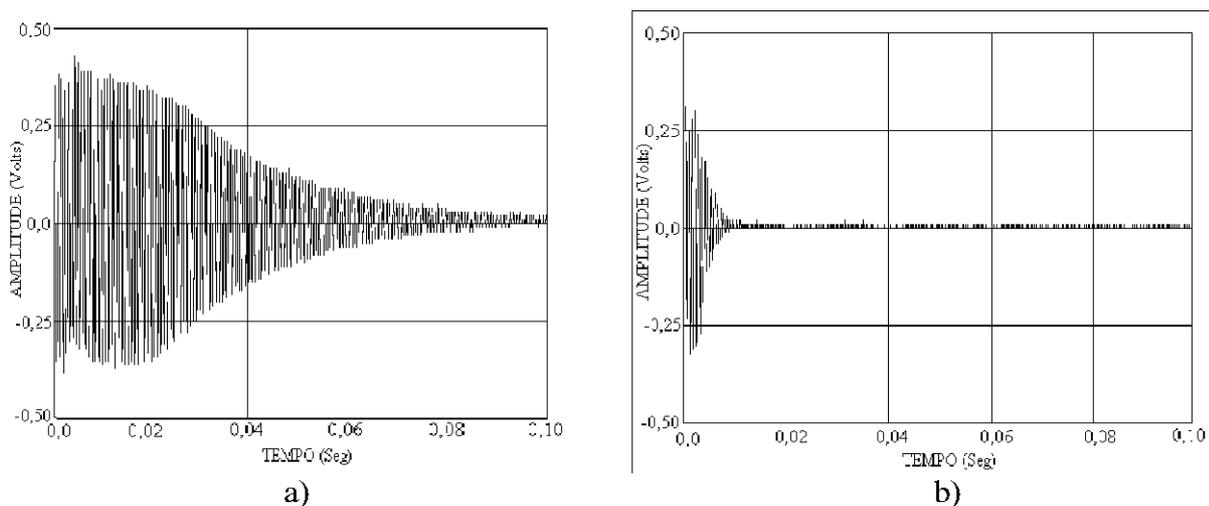


Figura 14. Resposta no tempo a) sem controle; b) com controle-amplificador (2).

6. CONCLUSÃO

A utilização da realimentação, produziu reduções consideráveis no nível de vibração da placa como mostram os resultados obtidos. Apesar de não ter havido diferença nos níveis de atenuação nos ensaios de regime permanente, no regime transitório o amplificador(2) apresentou melhores resultados. Isto comprova que a eficiência do controlador melhora quando se utiliza componentes eletrônicos mais rápidos. Para esta investigação mudou-se apenas o amplificador de potência, mantendo-se iguais os circuitos de amplificação, de filtragem e de defasagem.

7. REFERÊNCIAS

- Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., 1989, Investigation on Active Control of Sound Radiation from a Panel Using Piezoelectrics Actuators, AIAA Paper N° 89-1062.
- Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., Rogers, C. A., 1991, Piezoelectrics Actuators for Distributed Vibration Excitation of Thin Plates. Journal of Vibration and Acoustics 113, 100-107.
- Fuller, C.R., 1990, Active Control of Sound Transmission Radiation from Elastic Plates by Vibration Inputs. I. Analysis, J. Sound Vib. 136. 1-15.
- Fuller, C.R., Hansen, C.H., Snyder, S.D., 1989, Active Control Structurally Radiated Noise Using Piezoceramic Actuators, Inter-Noise 89 509-511.
- Niekerk, J.L., Tongue, B.H., Packard, A.K., 1995, Active Control of Circular Plate to Reduce Transient Noise Transmission, Journal of Sound and Vibration 183(4), 643-662.
- Silva, S. A., Dana, S. S., Araújo, C. S., 1997, Controle Ativo de Vibração Utilizando Atuadores Piezoelétricos, XIV COBEM, Bauru - SP.
- Silva, S. A., Dana, S. S., Araújo, C. S., 1998, Controle Ativo de Vibrações numa Placa Retangular com Atuadores Piezoelétricos - Realização Experimental, V CEM-NNE, Fortaleza - CE.
- Szilard, R., 1974, Theory and Analysis of plates, Prentice-Hall, Inc., Company Clifs, New Jersey.
- Wang, B.T., Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., 1990, Active Control of Structurally Radiated Noise Using Multiple Piezoelectrics Actuators, in Proceedings of AIAA SDM Conference, AIAA Paper 90-1172-CP, Long Beach, CA.
- Wang, B.T., Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., 1989, Active Control Panel Radiated Noise Using Multiple Piezoelectrics Actuators, J. Acoustic. Soc. Am. Suppl. 1 86, s84.
- Wang, B.T., Dimitriadis, E.K., Fuller, C.R., 1990, Active Control of Structurally Radiated Noise Using Multiple Piezoelectric Actuators, in Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS 3 1st Structures, Structural, Dynamics and Materials Conference, Long Beach, CA, 2-4 April.
- Zhou, S. W., et al, 1994a, A dynamic Model a Piezoelectric Actuator-driven Thin Plates, Proceedings of Smart Structures and Materials, SPIE, Orlando, FL; in press.

ACTIVE CONTROL OF VIBRATION, OF A FLEXIBLE STRUCTURE, FOR FEEDBACK, USING PIEZOELECTRICS SHEETS

Abstract. In this paper an active control approach to reduce the transient vibration transmission through a aluminum rectangular plate in a duct is presented. A feedback loop with analogical electronic circuits is used to supply the necessary electric signal to the cancellation of the plate vibration. The reference signal utilised by the controller to supply the piezoelectric sheet(actuator), which is bonded to the plate, is generated by other piezoelectric sheet (sensor) bonded to the same plate. As the performance of the control system is related with the speed of the electronic components, a comparison of the results obtained with the use of power amplifiers with different speeds is performed.

Keywords: Active control, Vibration control, Piezoelectric