

CONROLE DE ESTRUTURAS FLEXÍVEIS UTILIZANDO PASTILHAS PIEZELÉTRICAS

Carlos A. O. Martins

Fernando A. Rochinha

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. P.68503- 21945-970 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Sistemas e estruturas inteligentes são dispositivos dotados de sensores, atuadores e capacidade de processamento de sinais. Podem ser usados em aplicações que requerem alto grau de adaptação às mudanças em condições internas e externas. O advento de estruturas inteligentes possibilitou diversas formas de projeto, construção e controle estrutural, novas ligas com memória de forma, além de atuadores e sensores piezelétricos para sistemas de controle. A piezeletricidade é a capacidade do material gerar uma carga elétrica quando sujeito a deformações mecânicas e vice-versa. Este trabalho consiste na modelagem e controle de uma viga engastada com atuação de pastilhas piezelétricas, compostas por atuadores e sensores que agem combinadamente de modo a permitir o controle efetivo da estrutura. O principal objetivo desse trabalho é o controle do movimento de toda a estrutura flexível. O sistema é modelado através de modos assumidos e é adotada uma estratégia de controle ótimo LQR.*

***Palavras-chave:** Controle, Estruturas Flexíveis, Piezeletricidade*

1. INTRODUÇÃO

Grandes centros tecnológicos como a NASA e o MIT vêm trabalhando juntos para desenvolver aplicações de piezelétricos em sistemas aeroelásticos. Como exemplo, podem-se citar projetos de asas onde foram adaptados dispositivos piezelétricos usados para suprimir e controlar vibrações devido a excitações externas originadas a partir de turbulências, além de estruturas espaciais (Denoyer,1993), onde é vital a avaliação do comportamento dinâmico (Sampaio,1997) e o controle de componentes estruturais (Crawley, 1987).

O presente trabalho consiste na modelagem e no controle de uma viga com atuação de pastilhas piezelétricas, utilizadas como atuadores e sensores que agem combinadamente de modo a permitir o controle efetivo da estrutura. O principal objetivo desse trabalho é o controle do movimento da estrutura flexível.

Cerâmicas piezelétricas como o titanato zirconato de chumbo (PZT-5A) têm sido utilizadas em diversos projetos de controle estrutural (Bai,1996) por apresentar alta rigidez, boa linearidade, facilidade de implementação, alta sensibilidade de deformação, baixo ruído e insensibilidade à temperatura, além de poderem ser utilizadas em toda a

estrutura, possibilitando a adaptação de atuadores e sensores em diversas estruturas como placas e vigas, compondo assim estruturas denominadas ativas.

2. MODELAGEM DO PROBLEMA

Para obter as equações de movimento da estrutura flexível citada acima, adota-se uma abordagem usual: primeiro, obtém-se a velocidade de um ponto arbitrário da estrutura da cinemática de flexão de Euler-Bernoulli, que é discretizada através da técnica “Assumed Modes” (Junkins,1993), a qual denomina-se aqui Modos Geométricos, motivado pelo fato de que as formas geométricas escolhidas atendem às condições de contorno geométricas. Essa velocidade é usada para calcular a energia cinética da estrutura e de cada pastilha piezolétrica, para assim obter-se a energia cinética total do sistema. Utiliza-se um procedimento similar para a energia potencial e para o trabalho realizado por todas as forças atuantes no sistema. Essas quantidades são usadas para obter a energia potencial total. Encontram-se então equações diferenciais de movimento pelo princípio de Hamilton. Finalmente, o sistema resultante de equações diferenciais de segunda ordem é reescrito na forma de espaço de estados de 1ª ordem. Esses passos serão detalhados nos próximos tópicos. O modelo resultante foi implementado usando-se o software MATLAB da Mathworks®.

Seguindo, então, a abordagem usual para esse tipo de estrutura, descreve-se o deslocamento de um ponto da linha média, conforme esquematizado na Figura 1, através da Eq. 1:

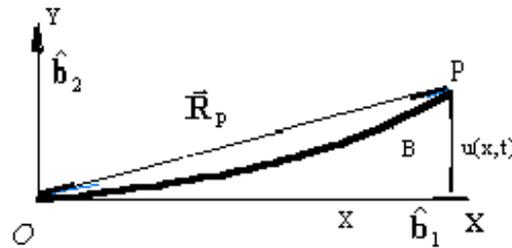


Figura 1 - Deslocamento elástico de um corpo flexível

$$\vec{R}_P(x,t) = x\hat{b}_1 + u(x,t)\hat{b}_2 \quad (1)$$

onde \vec{R}_P é o vetor posição de um ponto P, \hat{b}_1 e \hat{b}_2 são os vetores unitários associados às direções dos eixos X e Y, e u o deslocamento horizontal do vetor posição \vec{R}_P .

Assim, a velocidade do ponto P é dada por:

$$\vec{V}_P = \dot{\vec{R}}_P = \dot{u}(x,t)\hat{b}_2 \quad (2)$$

onde o ponto indica a derivação em relação ao tempo.

O deslocamento elástico u pode ser aproximado usando-se o método dos modos geométricos, de forma que:

$$u = u(x,t) \cong \sum_{j=1}^n \Phi_j(x)q_j(t) \cong \Phi \mathbf{q} \quad (3)$$

onde

$$\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n] \quad (4)$$

$$\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3, \dots, \mathbf{q}_n)^T \quad (5)$$

representam a matriz dos modos geométricos e o vetor de coordenadas generalizadas respectivamente. Conforme mencionado anteriormente, os modos geométricos (Φ_j) devem satisfazer as condições geométricas de contorno do problema. Assim eles foram escolhidos como:

$$\Phi_j(x) = 1 - \cos\left(\frac{jx\pi}{L}\right) + \frac{1}{2}(-1)^{j+1}\left(\frac{jx\pi}{L}\right)^2 \quad j=1, \dots \quad (6)$$

Desta forma a velocidade do ponto arbitrário P passa a ser escrita como:

$$\mathbf{V}_P = \Phi \dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

e, portanto,

$$\mathbf{V}_P^2 = \mathbf{V}_P \cdot \mathbf{V}_P = \dot{\mathbf{q}} \cdot (\Phi^T \Phi) \dot{\mathbf{q}} \quad (8)$$

A energia cinética total da estrutura será expressa através de:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_{\text{sub}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{piez}}} \mathbf{T}_{\text{piez}} \quad (9)$$

onde \mathbf{T}_{sub} representa a energia cinética da subestrutura (viga). \mathbf{T}_{piez} representa a energia cinética dos elementos piezelétricos, e o índice superior do somatório mostrado acima, n_{piez} , o número de pastilhas piezelétricas. A energia cinética será calculada pelas expressões:

$$\mathbf{T}_{\text{sub}} = \frac{1}{2} \int_0^L m_{\text{sub}} \mathbf{V}_P^2 dx, \quad \mathbf{T}_{\text{pi}} = \frac{1}{2} \int_{x_i}^{x_i+h_i} m_{\text{piez}} \mathbf{V}_P^2 dx \quad (10)$$

onde L é o comprimento da subestrutura, m_{sub} é a densidade da subestrutura por unidade de comprimento, m_{piez} é a massa da pastilha piezelétrica por unidade de comprimento, x_i é coordenada inicial do elemento piezelétrico, e h_i o comprimento do elemento piezelétrico. A matriz de massa é definida como:

$$\mathbf{M}_{\text{est}} = \int_0^L m_{\text{sub}} \Phi^T \Phi dx + \sum_{i=1}^{n_{\text{piez}}} \int_{x_i}^{x_i+h_i} m_{\text{piez}} \Phi^T \Phi dx \quad (11)$$

Substituindo, então a expressão (10) e (11) na equação (9), a energia total cinética é reescrita como

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}_{\text{est}} \dot{\mathbf{q}} \quad (12)$$

A energia potencial total da estrutura ativa é dada por

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\text{sub}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{piez}}} \mathbf{V}_{\text{piez}} \quad (13)$$

onde \mathbf{V}_{sub} é o trabalho realizado pela viga, \mathbf{V}_{piez} é a energia acumulada pelo elemento piezelétrico. A energia acumulada pela viga pode ser apresentada como:

$$V_{\text{sub}} = \frac{1}{2} \int_0^L E_{\text{sub}} I_{\text{sub}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 dx = \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K}_{\text{sub}} \mathbf{q} \quad (14)$$

onde E_{sub} é o módulo de elasticidade da viga, I_{sub} o momento de inércia da viga, e \mathbf{K}_{sub} a matriz de rigidez da viga dada por:

$$\mathbf{K}_{\text{sub}} = \int_0^L E_{\text{sub}} I_{\text{sub}} \boldsymbol{\Phi}'^T \boldsymbol{\Phi}' dx \quad (15)$$

O trabalho realizado pelas pastilhas piezelétricas é a soma das parcelas do trabalho conservativo e não conservativo definido como uma integral sobre o volume da pastilha piezelétrica. Assim, a energia potencial associada ao elemento piezelétrico será dada por:

$$\begin{aligned} W_{\text{piez}} &= (W_{\text{piez}})_c - (W_{\text{piez}})_{nc} = -V_{\text{piez}} \\ V_{\text{piez}} &= -\frac{1}{2} \int_{V_i} (-T_{1i} S_{1i} + D_{3i} E_{3i}) dV_i \\ &= -\frac{1}{2} w_{\text{piez}} \int_{x_i}^{x_i+h_i} \int_{y_i}^{y_i+t_{\text{piez}}} \begin{Bmatrix} D_{3i} \\ T_{1i} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_{3i} \\ S_{1i} \end{Bmatrix} dy dx \end{aligned} \quad (16)$$

onde y_i é a coordenada inicial do elemento piezelétrico a partir da linha neutra da viga e t_{piez} a espessura do referido elemento. A equação (2.19) pode ser reescrita como:

$$V_{\text{piez}} = \frac{1}{2} w_{\text{piez}} \int_{x_i}^{x_i+h_i} \int_{y_i}^{y_i+t_{\text{piez}}} [(\boldsymbol{\epsilon}_3^T - d_{31}^2 E_{\text{piez}}) E_{3i}^2 + 2d_{3i} E_{\text{piez}} E_{3i} S_{1i} - E_{\text{piez}} S_{1i}^2] dy dx \quad (17)$$

Usando as Eq. (3) e (17) e assumindo que as pastilhas piezelétricas estão perfeitamente coladas à viga, obtém-se

$$V_{\text{piez}} = \frac{1}{2} \gamma_i v_i^2 - \mathbf{q}^T \mathbf{b}_i v_i - \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K}_{\text{piez}} \mathbf{q} \quad (18)$$

onde v_i é a voltagem do elemento piezelétrico e

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{w_i h_i}{t_{\text{piez}}} (\boldsymbol{\epsilon}_3^T - d_{31}^2 E_p), \quad v_i = t_{\text{piez}} E_{3i} \\ \mathbf{b}_i &= d_{31} E_{\text{piez}} w_{\text{piez}} \left(y_i + \frac{t_{\text{piez}}}{2} \right) \int_{x_i}^{x_i+h_i} \boldsymbol{\Phi}'^T dx \\ \mathbf{K}_{\text{piez}} &= w_i t_{\text{piez}} E_{\text{piez}} \left(y_i^2 + y_i t_{\text{piez}} + \frac{t_{\text{piez}}^2}{3} \right) \int_{x_i}^{x_i+h_i} \boldsymbol{\Phi}'^T \boldsymbol{\Phi}' dx \end{aligned} \quad (19)$$

Substituindo as Eq. (14), (17) e (18) na equação (13), a energia total pode ser reescrita como:

$$V = -\frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{C}' \mathbf{v} - \mathbf{q}^T \mathbf{B}' \mathbf{v} - \frac{1}{2} \mathbf{q}^T \mathbf{K} \mathbf{q} \quad (20)$$

onde as matrizes \mathbf{V} , \mathbf{C}' , \mathbf{K}_{est} e \mathbf{B}' são:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}' &= \text{diag}[\gamma_i] \\ \mathbf{K}_{\text{est}} &= \mathbf{K}_{\text{sub}} + \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{\text{piez}} \\ \mathbf{B}' &= [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n] \\ \mathbf{V} &= [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T \end{aligned} \quad (21)$$

Para obter então as equações que governam a estrutura ativa, lança-se mão do Princípio de Hamilton (Meirovitch,1990):

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta T + \delta V) dt = 0 \quad (22)$$

de forma que após algumas manipulações algébricas, obtém-se o seguinte sistema de equações algébrico-diferenciais:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{\text{est}} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_{\text{est}} \mathbf{q} = -\mathbf{B}\mathbf{V} \\ \mathbf{C}\mathbf{V} = \mathbf{B}^T \mathbf{q} \end{cases} \quad (23)$$

Tendo em vista que o presente modelo será utilizado no controle de estruturas, define-se o vetor de estados $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix}$, obtendo-se então:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_s = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{V}_a \end{cases} \quad (24)$$

Onde \mathbf{V}_a é a voltagem do atuador e \mathbf{V}_s é a voltagem do sensor, e as matrizes de estado são descritas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ (-\mathbf{M}_{\text{est}}^{-1})\mathbf{K}_{\text{est}} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ (-\mathbf{M}_{\text{est}}^{-1})b_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= [(\gamma_2^{-1})b_2^T \ 0] \\ \mathbf{D} &= [0] \end{aligned} \quad (25)$$

Após a obtenção das matrizes de estado \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} , utilizam-se as teorias de controle e simula-se o comportamento do sistema para análise e posterior comparação

com resultados experimentais. Encerrada esta etapa, inicia-se a construção do protótipo e a utilização dos valores obtidos na modelagem para o controle da estrutura em tempo real.

3. CONTROLE

O problema do regulador linear (Meirovitch,1990) é definido como o projeto de uma entrada de controle que leve a planta de um estado inicial até um estado final desejado..

Considerando o sistema descrito pela equação linear de estados:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (26)$$

onde o vetor de estados $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$, o vetor de controle $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$, e a matriz do sistema \mathbf{A} e a matriz de influência de controle \mathbf{B} podem conter elementos variantes no tempo. O objetivo é determinar um ganho ótimo de controle de resposta $\mathbf{G}(t)$ para uma lei linear da forma:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{G}(t) \mathbf{x}(t) \quad (27)$$

que minimize a medida quadrática de desempenho (função custo):

$$J = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t_f) \mathbf{H} \mathbf{x}(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q}(t) \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R}(t) \mathbf{u}(t)] dt \quad (28)$$

onde \mathbf{H} e \mathbf{Q} são matrizes reais positivas semi-definidas simétricas, e \mathbf{R} é uma matriz real positiva simétrica definida. Contudo, assume-se que t_f é livre e t_0 é fixado. O problema de controle ótimo usando a medida quadrática de desempenho pode ser interpretado como o percurso do estado inicial ao zero utilizando a mínima força de controle.

A lei de controle introduzida na Eq. (27) pressupõe que todos os estados são conhecidos. Porém, nem sempre é possível medir todo o vetor de estados. Para sanar este problema utiliza-se, freqüentemente, um observador (Meirovitch,1990), que permite uma estimativa dos estados não medidos.

Para a análise do modelo, foi construído um código computacional que contempla todas as fases da modelagem matemática a partir de diversos parâmetros do sistema como por exemplo o número de modos assumidos, o número de atuadores piezolétricos utilizados e os diversos dados geométricos do problema. Este código computacional, deve simular resultados para que possam ser estipulados parâmetros e objetivos do controle da estrutura, além de determinar se o sistema em questão é controlável e observável. Este código foi elaborado no Matlab® utilizando os módulos (“toolbox”) de computação simbólica e de controle.

A abordagem de controle empregada foi o LQR, na qual a escolha dos parâmetros \mathbf{Q} e \mathbf{R} introduzidos na “Eq. 28” é responsável pela magnitude da força de controle atuante no sistema, além de outras características como o tempo de estabilização do sistema e a energia despendida. O ganho do observador determina a velocidade na qual o sistema estimará seus estados. Relações heurísticas demonstram que esta velocidade deve ser da ordem de dez vezes maior que o tempo de resposta do sistema .

O processamento digital de sinais é realizado pelo sistema DSP dSpace®, o qual a partir de variáveis calculadas no algoritmo acima citado e da planta de controle implementada pelo Simulink® inicia um processamento onde diversas rotinas são

realizadas para o efetivo controle em tempo real, a seguir apresenta-se na Fig. 2 a planta de controle utilizada no projeto.

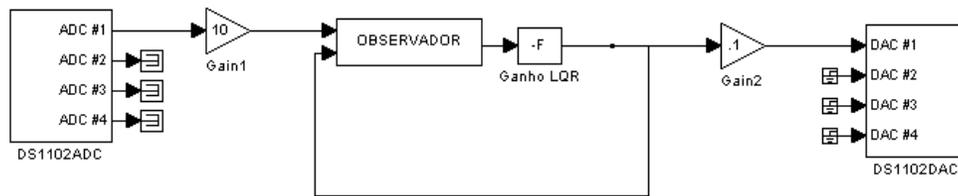


Figura 2 – Planta de Controle projetada no Simulink® para o controle de estruturas flexíveis

Os blocos ADC e DAC representam, respectivamente, a conversão do sinal analógico em digital e digital em analógico. Os blocos Gain1 e Gain 2 representam a ampliação e redução dos sinais utilizados pelo sistema dSpace como fator de proteção para sinais de magnitude elevada. O bloco observador representa o observador de estados de ordem completa, cujo ganho foi calculado a partir de uma modelagem com 2 modos geométricos, isto é, 4 estados onde 1 estado é medido e 3 estados são estimados. O bloco Ganho LQR representa a ação de controle LQR cujas matrizes Q e R foram determinadas de forma heurística.

4. PROTÓTIPO

O protótipo desenvolvido consiste de uma viga de alumínio engastada em um suporte metálico ao qual foram fixadas pastilhas piezelétricas, que servirão de atuadores e sensores. Na Fig. 3a é apresentada uma visão da bancada e da placa de processamento digital de sinais, e na Fig. 3b uma visão mais detalhada das pastilhas piezelétricas fixadas na viga de alumínio:



Figura 3a - Visão da bancada e da placa de processamento digital de sinais

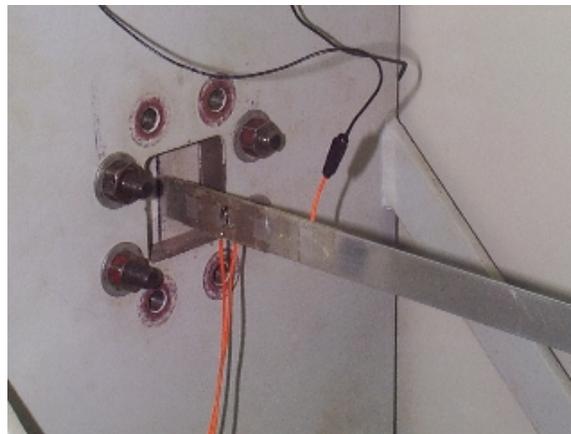


Figura 3b - Visão detalhada das pastilhas piezelétricas fixadas na viga de alumínio

Uma das extremidades da viga de alumínio (Kantor,1994) é fixada num suporte metálico, que é apoiado numa bancada específica para ensaios dinâmicos cuja disposição permite que os resultados obtidos não sejam afetados por outros experimentos realizados simultaneamente no laboratório. Esse suporte foi preparado

especificamente para ensaios de vigas em condições de engaste, permitindo que a viga seja montada nas posições horizontal e vertical. A viga é então fixada no suporte na posição vertical para suprimir o efeito do peso próprio. Três pastilhas piezelétricas são fixadas na viga, podendo cada uma delas ser usada tanto como atuador quanto como sensor. As duas primeiras pastilhas piezelétricas que estão próximas ao engaste foram usadas como atuador e a terceira pastilha piezelétrica usada como sensor.

As dimensões da viga de alumínio são 500x20x1.5 mm, porém o comprimento livre a partir do engaste é de 414 mm. O módulo de elasticidade da viga de alumínio é de 71Gpa. A viga de alumínio foi aterrada com a finalidade de estabelecer a diferença de potencial elétrico entre a pastilha piezelétrica e a estrutura onde é fixada, sendo o referido fio terra ligado ao terra dos amplificadores de potência das pastilhas piezelétricas utilizadas como atuador e sensor.

As pastilhas cerâmicas piezelétricas de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) utilizadas foram adquiridas na APC (American Piezoceramic), código APC-840. O comprimento, largura e espessura das pastilhas piezelétricas usadas como atuador são 50x20x0.5 mm respectivamente, convencionadas pelas letras h, w e t. As dimensões da pastilha piezelétrica usada como sensor são 25x20x0.5 mm. O módulo de elasticidade das pastilhas piezelétricas é de 61 GPa, a permissividade relativa (ϵ_3t), ou seja, a permissividade do referido material cerâmico dividida pela permissividade do vácuo, é de 1750, e o coeficiente de carga piezelétrica (d_{31}) é de -125×10^{-12} m/V.

5. RESULTADOS

Realizaram-se dois experimentos para verificar o funcionamento do sistema de controle, assim como a efetividade da lei de controle utilizada.

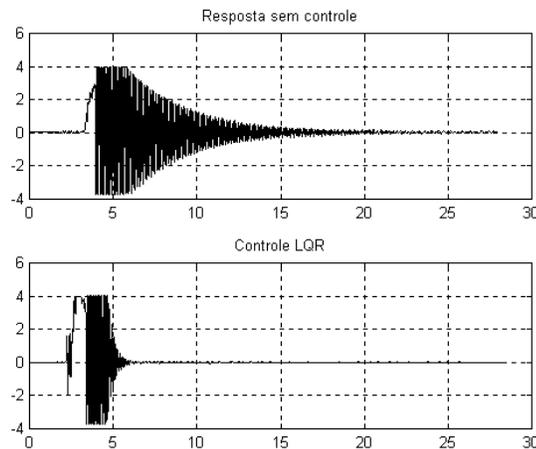


Figura 5 – Voltagem do sensor piezelétrico sem/com controle

O primeiro experimento consiste em deslocar a ponta da viga de uma distância prescrita de dez milímetros, soltá-la e comparar o tempo da oscilação até a estabilização com e sem a utilização do controle LQR. Para implementar esse deslocamento inicial da ponta da viga como excitação do sistema, utilizou-se uma linha amarrada na ponta da viga e um anteparo graduado para referência desse deslocamento. A “Fig. 5” apresenta a queda da tensão elétrica do sensor piezelétrico ao longo do tempo sem a utilização do controle, e depois utilizando o controle LQR.

O segundo experimento apresenta a perturbação e o controle através de elementos piezelétricos utilizados como atuador em intervalos distintos, ou seja, os elementos

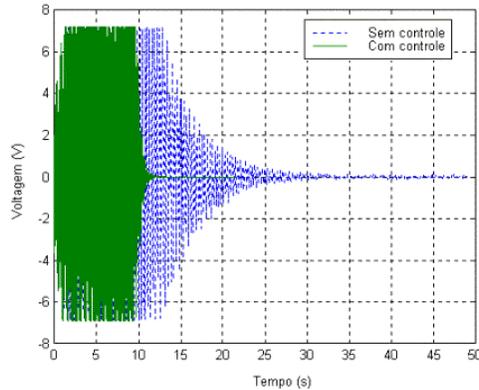


Figura 6 - Voltagens do sensor com e sem controle utilizando elementos piezelétricos para perturbação e controle.

piezelétricos usados como atuador são excitados através de uma entrada senoidal de amplitude 0.5 Volts e frequência 8.5 Hertz, durante um intervalo de tempo de 10 s, quando então a perturbação é cessada e o sistema de controle passa a atuar. A Fig. 6 apresenta as voltagens do sensor com e sem controle utilizando elementos piezelétricos para perturbação e controle.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

No presente projeto foi desenvolvido um protótipo de uma estrutura inteligente constituído de uma viga esbelta à qual foram fixados elementos piezelétricos, que servem de atuadores e sensores.

Os resultados apresentados demonstraram a viabilidade do uso do conceito de estruturas inteligentes no controle de vibrações indesejáveis e a significativa redução no tempo de estabilização a partir de perturbações do sistema.

A conclusão mais significativa deste trabalho é a viabilidade da construção do protótipo de uma estrutura inteligente utilizando elementos piezelétricos, onde alcançam-se excelentes resultados nas operações de monitoração, atuação e controle estrutural.

7. REFERÊNCIAS

- Bai, M. R., Lin, G. M., 1996, "The Development of a DSP-Based Active Small Amplitude Vibration Control System for Flexible Beams by Using The LQG Algorithms and Intelligent Materials", *Journal of Sound and Vibration*, v 198, n 4, pp 411-427.
- Crawley, E. F., De Luis, J., 1987, "Use of Piezeletric Actuators as Elements of Intelligents Structures", *AIAA Journal*, v 25, n 10, pp 1373-1385.
- Denoyer, K., Kwak, M. K., 1996, "Dynamic Modelling and Vibration Suplestion of a Slewing Structure Utilizing Piezeletric Sensors and Actuators", *Journal of Sound and Vibration*, v 189, n 1, pp 13-31.
- Junkins, J.L., Kim, Y., 1993, *Introduction to Dynamics and Control of Flexible Structures*, AIAA – Education Series, Ohio, USA.

Kantor, G. A., Dayawansa, W. P., 1995, Linear Control Theory as Applied to Smart Structures. M. Sc., ISR, Maryland, USA.

Meirovitch, L. , 1990, Dynamics and Control of Structures, Wiley & Sons, Virginia, USA.

Sampaio, R., 1997, Introdução à Dinâmica, Estabilidade e Controle através do Matlab, XX CNMAC, PUC-Rio.

Ogata, K., 1990, Modern Control Engineering, 2o Prentice Hall Inc.

8. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi parcialmente financiado pela Agência Espacial Brasileira através dos contratos 007 e 011/98 do projeto Uniespaço. Além disso, o Laboratório de Vibrações da PUC-Rio através do prof. Rubens Sampaio , gentilmente, cedeu espaço e equipamentos para sua realização.

ABSTRACT

CONTROL OF FLEXIBLE STRUCTURES USING PIEZOLETRIC PATCHES

Smart structures and systems are devices containing sensors, actuators and ability to signal microprocessing. They can be used in applications which require high level of adaptations to changes in internal and external conditions. The advent of smart structures made possible many types of project, construction and structure control, new shape memory alloys, besides actuators and piezoelectric sensors to control systems. The piezoelectricity is the material capacity to generate an electric charge when subjected to mechanical deformations and vice-versa.

This work consists of modeling and control of a beam cantilevered with actuation of piezoelectric ceramics, composed of actuators and sensors that work together in such a way to allow the effective control of the structure. The main objective of this work is to control the movement of the entire slewing structure. The system is modeled by means of assumed modes and an optimal LQR control strategy is adopted.

Keywords: Control, Smart structures, Piezoelectric