

ESTUDO DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE VIBRAÇÕES EMPREGANDO PIEZOCERÂMICAS COMBINADAS COM CIRCUITOS SHUNT.

Danuza Cristina Santana

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, caixa postal 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

dcsantana@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, caixa postal 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

domingos@ufu.br

Valder Steffen Jr

Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, caixa postal 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

vsteffen@mecanica.ufu.br

Resumo *O desenvolvimento de novas tecnologias permitiu a construção de equipamentos industriais, veículos e estruturas cada vez mais leves e com velocidades de operação cada vez mais elevadas, ocasionando o aumento dos níveis de vibração e ruído gerados. Em função disto, desde a década 50 o problema do controle de vibrações e ruído tem sido objeto de intenso esforço de pesquisa da comunidade científica. Como resultado, diferentes técnicas de controle foram desenvolvidas e continuam sendo aperfeiçoadas. O presente trabalho trata de uma técnica de controle passivo de vibrações que utiliza cerâmicas piezoelétricas PZT (zirconato titanato de chumbo) ligadas a circuitos elétricos passivos. Estes circuitos elétricos podem ser puramente resistivos, resistivos-indutivos, capacitivos e switched (chaveados). Demonstra-se que a associação entre a pastilha piezoelétrica e o circuito resistivo, em um dispositivo denominado shunt resistivo, confere ao material piezoelétrico um amortecimento similar ao obtido com os materiais viscoelásticos. Por outro lado, quando a pastilha piezoelétrica é ligada ao circuito resistivo-indutivo produz-se no sistema uma ressonância elétrica que pode ser sintonizada para o controle de um determinado modo de vibração desejado, de maneira similar aos absorvedores dinâmicos de vibração. Neste caso, tem-se o chamado circuito shunt ressonante. Pastilhas piezoelétricas associadas a circuitos puramente capacitivos formam os shunts capacitivos e promovem alteração na frequência natural do sistema. Shunts switched (chaveados) consistem no chaveamento contínuo de um transdutor piezoelétrico associado a uma estrutura vibrante e são também chamados shunts semi-passivos. Neste trabalho apresenta-se uma revisão sobre o estado da arte dos diferentes tipos de shunts, sendo também apresentada a modelagem analítica destes sistemas.*

Palavras-chave: *Vibrações, Controle Passivo, Piezoelétricos, Shunt.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais piezoelétricos tanto como atuadores como sensores para fim do controle ativo de vibrações e ruído têm sido amplamente investigada.

Forward (1979) propôs, em um trabalho pioneiro, a utilização de elementos piezoelétricos associados a circuitos elétricos passivos (*shunts* piezoelétricos) no controle passivo de vibrações. O

princípio básico consiste em converter a energia mecânica da estrutura em energia elétrica através da utilização dos elementos piezoelétricos e dissipar esta energia por meio do circuito elétrico externo (*shunt*).

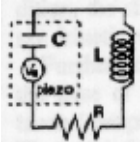
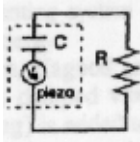
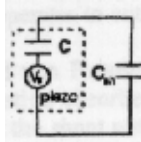
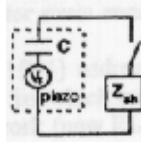
À partir do trabalho de Forward, Hagood e Von Flotow (1991) propuseram a utilização de cerâmicas piezoelétricas PZT (zirconato titanato de chumbo) associadas a circuitos elétricos puramente resistivos (*shunt* resistivo) e a circuitos elétricos resistivo-indutivo (*shunts* ressonantes). Através de uma análise qualitativa foi observado que o *shunt* resistivo confere ao material piezoelétrico um amortecimento similar ao obtido com os materiais viscoelásticos. Por outro lado, o *shunt* ressonante produz no sistema uma ressonância elétrica que pode ser sintonizada para o controle de um determinado modo de vibração desejado, de maneira similar aos absorvedores dinâmicos de vibração.

Um outro tipo de *shunt* piezoelétrico denominado *shunt switched* (chaveado) foi proposto por Guyomar *et al.* (1999). Nesta configuração, realiza-se o chaveamento contínuo de um transdutor piezoelétrico integrado a uma estrutura vibrante. O chaveamento remove periodicamente as cargas elétricas dos elementos piezoelétricos alterando a rigidez mecânica e criando não linearidades, gerando, desta forma, uma série de mecanismos de dissipação.

Davis e Lesieutre (2000), estudam a utilização de *shunts* capacitivos como atuadores piezoelétricos inerciais e verificam que a associação dos capacitores com chaveamento cria um absorvedor dinâmico de vibrações semi-ativo. Estes autores constataram que *shunts* capacitivos, promovem a alteração da frequência natural do sistema e os *shunts* resistivos, promovem a alteração da frequência natural e do amortecimento modal.

A Tabela (1) sumariza as principais configurações de *shunts* piezoelétricos.

Tabela 1: Principais configurações de *shunts* piezoelétricos.

Indutivo	Resistivo	Capacitivo	Chaveado
 Absorvedor Ressonante	 Amortecimento dependente da frequência	 Rigidez dependente da frequência	 Transferência de energia controlada
Estratégias de Sintonia Passivo x indutores sintéticos Unimodal x multimodal Sintonia Ativa Efeitos da topologia do circuito: Amortecimento estrutural Não linearidades Circuito ativo-passivo híbrido.	Pico de amortecimento. Sintonia dependente da frequência Efeitos na energia de deformação modal: Tamanho do eletrodo Rigidez local Amortecimento de compósitos com fibras reforçantes	Ajuste da rigidez de parte do absorvedor dinâmico de vibrações. <i>Shunt</i> ativo.	<i>Shunt</i> ativo

Na seção a seguir, são apresentados os fundamentos da modelagem analítica destes sistemas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Materiais piezoelétricos podem ser utilizados segundo o efeito piezoelétrico direto ou inverso. O efeito

piezoelétrico direto é o efeito de sensor: quando uma tensão mecânica é aplicada, desenvolvem-se polarizações (distribuições de cargas elétricas por unidade de área), que são proporcionais à tensão aplicada. O efeito piezoelétrico inverso traduz o efeito de atuador: quando um campo elétrico é aplicado, o material desenvolve alongamentos e distorções, que são proporcionais ao campo elétrico aplicado.

O acoplamento eletromecânico característico dos materiais piezoelétricos é representado pela seguinte equação constitutiva na forma matricial (IEEE):

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d \\ d_t & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde: D é o vetor de deslocamentos elétricos.

d é a matriz dos módulos piezoelétricos do material.

ε é a matriz de permissividade do material piezoelétrico.

E é o vetor campo elétrico.

S é o vetor de deformações.

s é a matriz de flexibilidade.

A direção 3 está associada com a direção de polarização do material piezoelétrico que é aproximadamente isotrópico nas outras duas direções, como mostra a Figura 1. O superescrito ()^T indica que estes valores foram medidos com tensão mecânica constante e o superescrito ()^E significa que foram medidos em campo elétrico constante.

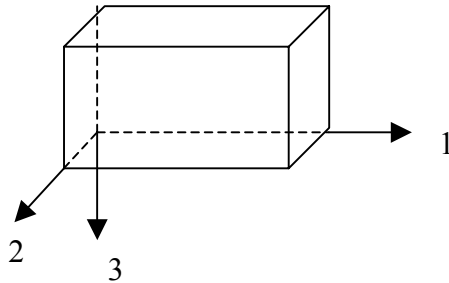


Figura 1- Direções de polarização do material piezoelétrico.

Assumindo que o campo elétrico dentro do material seja uniforme e que os deslocamentos na superfície também são uniformes, é possível reescrever as equações (1) no domínio de Laplace, em termos de voltagem e corrente, sob a forma:

$$\begin{bmatrix} I \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sC_p^T & sAd \\ d_t L^{-1} & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^D(s) & sAd \\ d_t L^{-1} & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde: I é a corrente elétrica.

V é a tensão elétrica.

A é a matriz diagonal das áreas das faces do elemento piezoelétrico.

L é a matriz diagonal dos comprimentos do elemento piezoelétrico.

C_p^T é a capacitância entre as faces do elemento piezoelétrico.

Y^D é a matriz de admitâncias do elemento piezoelétrico em circuito aberto, devida a sua capacitância inerente, com condições de contorno livres.

Para aplicações de *shunts* piezoelétricos, um circuito elétrico passivo é conectado entre as superfícies dos eletrodos, como mostra a Figura 2. Como o circuito é posicionado sobre os eletrodos ele fica em paralelo com a capacitância inerente do piezoelétrico naquela direção. Como as admitâncias em paralelo somam-se, a equação (2) pode então ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} I \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^{EL} & sAd \\ d_t L^{-1} & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ T \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde

$$\left(Y^{EL}\right)^{-1} = Z^{EL} \quad (4)$$

sendo Z^{EL} é a matriz de impedância elétrica combinada do PZT e do circuito *shunt*.

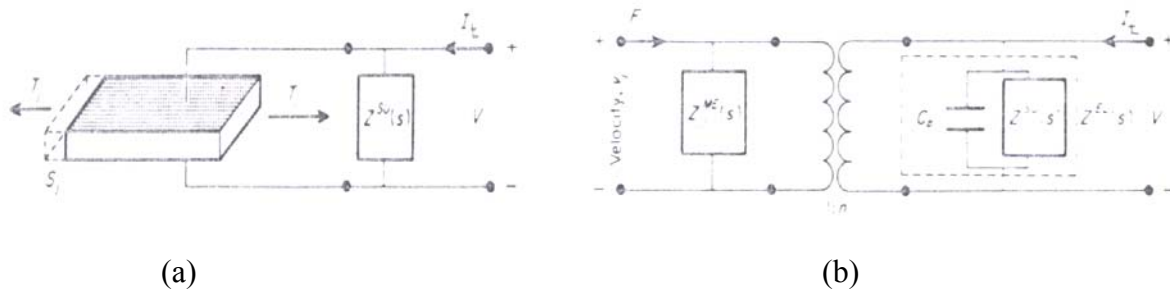


Figura 2- Modelo físico simplificado de um *shunt* piezoelétrico (a) e seu circuito elétrico análogo (b). (Extraído de Hagood e Von Flotow, 1991).

Desenvolvendo a equação (3) obtém-se a seguinte expressão que relaciona a flexibilidade do *shunt* piezoelétrico e as impedâncias elétricas normalizadas:

$$s^{SU} = s^E \left(1 - k_{ij}^2 \bar{Z}^{EL}\right) \quad (5)$$

onde k_{ij}^2 é o coeficiente de acoplamento eletromecânico. Este coeficiente é definido como sendo a razão entre a máxima energia armazenada pelo capacitor e a máxima energia armazenada na deformação do material com os eletrodos piezoelétricos abertos. Fisicamente representa a porcentagem de energia mecânica de deformação que é convertida em energia elétrica.

Define-se a impedância do circuito elétrico *shunt* como sendo:

$$\bar{Z}^{ME} = \frac{(1 - k_{ij}^2)}{(1 - k_{ij}^2 \bar{Z}^{EL}(s))} \quad (6)$$

2.1 Circuito *Shunt* Resistivo

No circuito *shunt* piezoelétrico resistivo um resistor é posicionado em paralelo com a capacitância inerente ao piezoelétrico.

O resistor proporciona a dissipação de energia por efeito Joule no lado elétrico e permite assim que o fator de perda seja aumentado, chegando a ser superior ao fator de perda do circuito piezoelétrico aberto ou em curto circuito. Para este caso, a impedância adimensional é dada por:

$$\bar{Z}^{EL} = \frac{R_i C_{pi}^T s}{(R_i C_{pi}^T s + 1)} \quad (7)$$

O resistor altera as propriedades do material piezoelétrico, tornando seu comportamento similar ao dos materiais viscoelásticos, sendo o fator de perda e o módulo complexo, dados respectivamente por:

$$\eta(\omega) = \frac{\rho_i k_{ij}^2}{\{(1 - k_{ij}^2) + \rho^2\}} \quad , \quad \bar{E}_{ij}(\omega) = \frac{1 - k_{ij}^2 + \rho_i^2}{(1 + \rho^2)} = 1 - \frac{k_{ij}^2}{(1 + \rho^2)} \quad (8)$$

A Figura 2 representa a variação do fator de perda e do módulo de armazenamento em função da frequência, para valores de coeficientes de acoplamento longitudinal e transversal. Verifica-se que o fator de perda depende do coeficiente de acoplamento do sistema, quanto maior for o coeficiente de acoplamento, maior será o amortecimento. Observa-se também que tanto o fator de perda como o módulo de armazenamento são fortemente dependentes da frequência. Esta dependência é relativamente mais acentuada do que ocorre para a maioria dos materiais viscoelásticos.

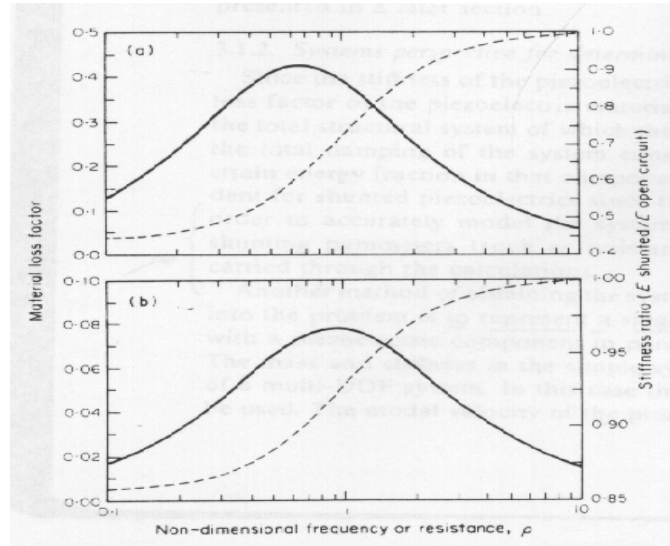


Figura 2- Propriedades materiais *shunts* piezoelétricos resistivos em (a) caso longitudinal ($k_{33}=0,75$) ou (b) caso transversal ($k_{31}=0,38$) fator de perda e módulo complexo. (Extraído de Hagood e Von Flotow ,1991).

2.2 Circuito *Shunt* Ressonante

Este circuito consiste em utilizar um resistor e um capacitor acoplados ao PZT, de tal forma que, juntamente com a capacitância inerente ao PZT, eles formem um circuito RLC. Este circuito pode ser ajustado para aumentar consideravelmente o amortecimento de um dado modo e tem atuação similar ao absorvedor dinâmico de vibrações.

A impedância mecânica adimensional do circuito *shunt* piezoelétrico ressonante é dada por:

$$\bar{Z}^{RSP} = 1 - k_{ij}^2 \frac{\delta^2}{(\gamma^2 + \delta^2 \gamma r + \delta^2)} \quad (9)$$

onde as normalizações são definidas em relação a alguma frequência de normalização arbitrária ω_n .

O parâmetro δ reflete a frequência para a qual o circuito elétrico é sintonizado e o parâmetro r é uma expressão para o amortecimento no circuito *shunt*.

$$\delta = \frac{\omega_e}{\omega_n}, \quad \gamma = \frac{s}{\omega^E}, \quad r = \omega_n^E R_i C_p^S \quad (10)$$

Para esta configuração, o fator de perda e o módulo complexo são expressos sob a forma:

$$\eta_{ii}^{RSP} = \frac{k_{ij}^2 \delta^2 r g}{(\delta^2 - g^2)^2 + (\delta g r)^2 - k_{ij}^2 \delta^2 (\delta^2 - g^2)}, \quad \bar{E}^{RSP} = 1 - k_{ij}^2 \frac{\delta^2 (\delta^2 - g^2)}{((\delta^2 - g^2)^2 + (\delta g r)^2)} \quad (11)$$

onde g é a forma real de γ .

A Figura 3 representa as curvas representativas do fator de perda e do módulo complexo, para valores comuns destes parâmetros.

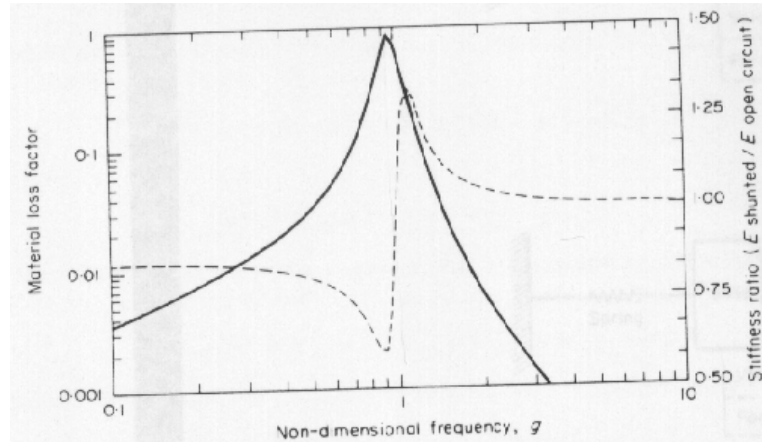


Figura 3- Propriedades materiais de *shunts* piezoelétricos ressonantes ($\delta=1,0$ e $r=0,20$) no modo transversal de operação ($k_{33}=0,38$) fator de perda e módulo complexo. (Extraído de Hagood e Von Flotow, 1991)

Através da comparação das Figuras 2 e 3 possível observar que existe uma significativa diferença das curvas de módulo complexo e fator de perda, para o caso do *shunt* resistivo e do *shunt* resistivo indutivo. Para este último, a rigidez efetiva do material e o amortecimento possuem variações altamente não lineares com a frequência e o parâmetro δ . Devido a isto, o processo de otimização para a obtenção da máxima energia dissipada é realizado através da observação das similaridades com os absorvedores dinâmicos de vibrações. Comparando-se os dois sistemas verifica-se que o coeficiente de acoplamento eletromecânico para o piezoelétrico sintonizado, k_{ij}^2 , possui a mesma função que a razão de massa β para o absorvedor dinâmico de vibrações. Por meio desta analogia, através de um desenvolvimento relativamente longo, realizado sobre as funções de transferência os dois sistemas, obtém-se os valores ótimos para o parâmetro de sintonia e o amortecimento ótimo do circuito, cujas expressões são dadas respectivamente por:

$$\delta_{ij}^{opt} = \sqrt{1 + k_{ij}^2}, \quad r^{opt} = \frac{\sqrt{2}}{(1 + k_{ij}^2)} k_{ij}^2 \quad (12)$$

Um dos problemas da implementação dos *shunts* ressonantes está na necessidade de elevados valores de indutância, que não são de fácil implementação prática, pois requerem indutores grandes

e de peso elevado. Para contornar esta dificuldade, tem sido usados os chamados indutores sintéticos, que consistem em circuitos elétricos ativos contendo amplificadores operacionais que são capazes de simular indutores reais (Behrens, 2003).

2.3 Circuito *Shunt* Capacitivo

No circuito *shunt* piezoelétrico capacitivo o capacitor é posicionado em paralelo com a capacitância inerente ao piezoelétrico. Este circuito altera significativamente a rigidez do elemento piezoelétrico sem alterar o amortecimento. Na literatura não existem muitos trabalhos dedicados a esta técnica específica.

A impedância elétrica do circuito *shunt* capacitivo é dada por:

$$\bar{Z}^{cs} = \frac{1}{sC} \quad (13)$$

Verifica-se, neste caso, que a impedância elétrica é dependente apenas da capacitância do circuito *shunt*. Desta forma, o *shunt* capacitivo é um elemento puramente reativo, e com isto não ocorrem alterações no amortecimento, mas apenas na frequência natural, como mostra a Figura 4.

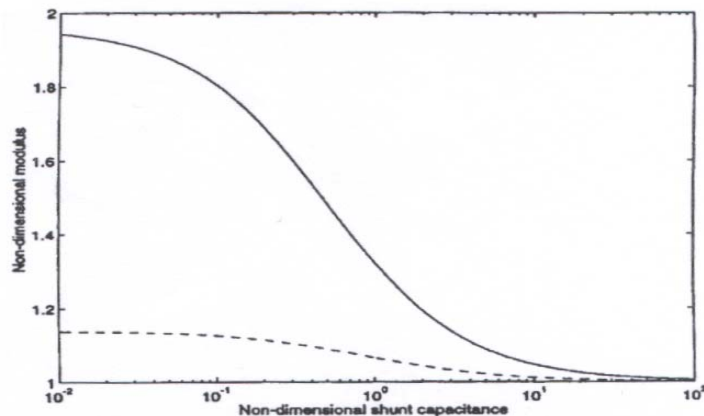


Figura 4-Propriedades materiais *shunts* piezoelétricos capacitivos.(_____ $k_{ij}=0,70$)(_ _ _ $k_{ij}=0,35$).
(Extraído de Lesieutre,)

2.4 Circuito *Shunt* Chaveado

No circuito *shunt* piezoelétrico chaveado, é realizado o chaveamento de um transdutor piezoelétrico que está acoplado a uma estrutura vibrante. A idéia básica deste sistema é deformar adequadamente a forma de onda da voltagem de saída do PZT afim de criar um atraso na fase entre a voltagem da saída e o deslocamento mecânico. A distorção da voltagem é obtida por chaveamento do curto circuito para a configuração de circuito aberto em uma seqüência repetitiva sincronizada com o movimento. O chaveamento remove periodicamente as cargas elétricas dos elementos piezoelétricos alterando a rigidez mecânica e criando não linearidades, gerando, desta forma, uma série de mecanismos de dissipação. Corr e Clark (2002), comparam duas técnicas de *shunts* piezoelétricos chaveamento com *shunt* piezoelétrico ressonante. Na primeira técnica, denominada chaveamento estático, o elemento piezoelétrico é chaveado do circuito aberto para o circuito fechado no intervalo específico do ciclo de vibração da estrutura. Esta ação de chaveamento tem o efeito de alterar a rigidez da estrutura e, conseqüentemente, a energia de deformação do sistema mecânico, removendo assim a energia do modo estrutural de interesse. Na segunda técnica, denominada chaveamento pulsado, o elemento piezoelétrico é brevemente chaveado para um circuito *shunt* resistivo/ indutivo (RL) em um intervalo específico do ciclo de vibração da estrutura. Esta ação de chaveamento permite uma carga gerada ser aplicada ao elemento de forma similar ao

conhecido controle *feedback* em velocidade e as técnicas de controle ótimo no tempo. Através de uma comparação do desempenho destes dois circuitos e o circuito *shunt* indutivo para o controle do terceiro modo de uma viga de alumínio bi-engastada, verificou-se que o chaveamento estático não obteve o desempenho desejado, uma vez que a atenuação obtida foi de apenas 2dB e que os circuitos *shunt* chaveado pulsado e *shunt* indutivo obtiveram atenuações de 12dB e 20dB respectivamente, como mostra a Figura 5. Porém, a técnica de chaveamento pulsado apresenta maior facilidade de sintonização e mostra-se menos susceptível a variações no sistema que a técnica de *shunt* ressonante.

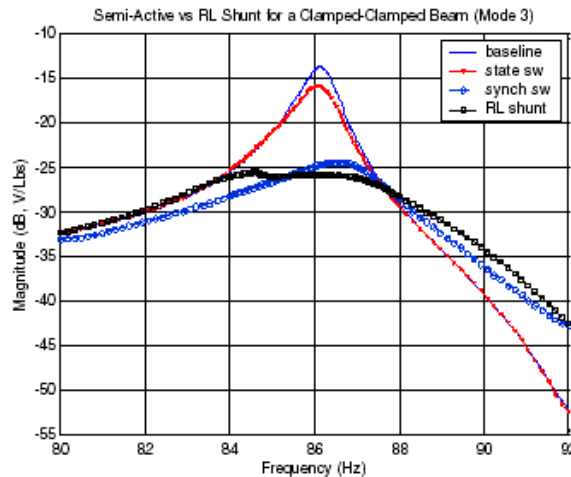


Figura 5 – Controle do terceiro modo de uma viga bi engastada utilizando-se circuito *shunt* ressonante, circuito *shunt* chaveado estaticamente e circuito *shunt* chaveado de forma pulsada. (Extraído de Corr e Clark, 2002)

3. CONCLUSÕES

O levantamento do atual estado da arte revela que o controle passivo de vibrações e ruído empregando piezocerâmicas combinadas com circuitos *shunt* é uma técnica promissora, passível de aplicação em diversos tipos de produtos industriais, com significativo ganho de eficiência e custo quando comparado a outras técnicas de controle passivo de vibrações. Destacam-se algumas vantagens específicas de vários tipos de circuitos *shunt* descritos neste trabalho; os circuitos *shunt* resistivos possuem relativa insensibilidade à temperatura (comparado com materiais viscoelásticos) e elevados fatores de perda; os circuitos *shunt* ressonantes apresentam comportamento semelhante aos absorvedores dinâmicos de vibrações, assim, para o controle de um dado modo de interesse é necessário que o dispositivo *shunt* ressonante seja sintonizado na frequência natural deste modo; os circuitos *shunts* capacitivos proporcionam alteração da rigidez da estrutura e com isto alteram suas frequências naturais; finalmente circuitos *shunt* chaveados pulsados apresentam um desempenho similar aos circuitos *shunt* ressonadores, com a vantagem de necessitarem de menores valores de indutância e serem menos sensíveis à variações na frequência de sintonia.

Cabe salientar que é possível atenuar vibrações em um sistema mecatrônico numa faixa ampla de frequência pela instalação de vários PZTs com circuitos *shunt* sintonizando cada circuito a uma frequência da faixa sintonia. Neste caso, os parâmetros dos vários circuitos *shunt* devem ser obtidos através de técnicas de otimização.

Finalmente, um aspecto que merece atenção é o fato dos sistemas de controle passivo dispensarem a utilização de fontes externas de potência e de complexos sistemas de controle, tais como os encontrados nos sistemas ativos.

4. REFERÊNCIAS

Forward, R.L., 1979, “Electronic damping of vibrations in optical structures”, Journal of Applied

- Optics, Vol 18 (5), pp 690-697.
- Hagood, N.W., Flotow, A.V., 1991, "Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks", Journal of Sound and Vibration, Vol 146(2), pp 243-268.
- Guyomar, D., Richard, C., Audigier, D., 1999, "A new vibration damping method using a semi-passive contro" 2ND EAA International Symposium on Hydroacoustics.
- Davis, C.L., Lesieutre, G.A., 2000, "An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitive shunting of piezoelectric stiffness", Journal of Sound and Vibration, Vol 232, pp 601-617.
- Davis, C.L., Lesieutre, G.A., Dosch, J., "A tunable electrically shunted piezoceramic vibration absorber. (PIA)" SPIE Vol 3045, pp51-59.
- IEEE Std 176-1978 IEEE Standard in Piezoelectricity, 1978 9-14. The institute of electrical and electronics Engineers.
- Behrens, S., Fleming, A.J., Moheimani, S.O.R., 2003, "A broadband controller for shunt piezoelectric damping of structural vibration" Smart Materials and Structures, Vol 12, pp18-28.
- Corr, L. R., Clark, W. W., 2002, "Comparison of low frequency piezoelectric switching shunt techniques for structural damping " Smart Materials and Structures, Vol 11, pp 370-376.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores retêm os direitos autorais por este trabalho.

STUDY OF VIBRATION CONTROL TECHNIQUES USING PIEZOCERAMICS COMBINED WITH SHUNT CIRCUITS.

Danuza Cristina Santana

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, P.O. Box1 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

dcsantana@mecanica.ufu.br

Domingos Alves Rade

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, P.O. Box1 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

domingos@ufu.br

Valder Steffen Jr

School of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, P.O. Box1 593 –CEP 38400-902 Uberlândia –MG – Brasil.

vsteffen@mecanica.ufu.br

Due to the development of new technologies, industrial structures are made of lighter materials and work at higher operation speeds. Since the fifties last century, the use of piezoelectric elements in noise and vibration control systems has been investigated. The present paper addresses a passive technique for vibration control by employing piezoelectric patches associated with passive electrical circuits, assuming the following configurations: purely resistive (shunt resistive); resistive inductive (shunt resonant; capacitive (shunt capacitive) and switched (shunt switched). The resistive shunt produces an effect similar to the viscoelastic materials. The resonant shunt introduces an electrical resonance, which can be optimally tuned to structural resonances, in a similar manner to a mechanical vibration absorber. The capacitive shunt changes the natural frequencies of the system. Shunt switched consists of a continuous switching of a piezoelectric transducer associated to a vibrating structure. This paper presents a review of the state of art of the different kind of shunt configurations, and the analytical modeling of the resulting mechatronic system.

Key-words: Vibration, Passive control, Piezoelectric, shunts.