

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM UMA VIGA UTILIZANDO CIRCUITO SHUNT DE CAPACITÂNCIA NEGATIVA COM RESISTOR EM SÉRIE ACOPLADO A UM TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Alan Gonçalves Paulo e Silva, alangps1@gmail.com¹
Antonio Almeida Silva, antonio.almeida@ufcg.edu.br²
Diego David Silva Diniz, diego.diniz@ufersa.edu.br³
Rômulo Pierre Batista dos Reis, soromulo@hotmail.com⁴

¹Universidade Federal da Paraíba, UFPB. Departamento de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB.

²Universidade Federal de Campina Grande, UFCG. Uni. Acadêmica de Engenharia Mecânica, Campina Grande – PB.

³Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFRSA. Departamento de Engenharia Mecânica, Caraubas – RN.

⁴Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFRSA. Departamento de Engenharia Mecânica, Mossoró – RN.

Resumo: As vibrações associadas a estruturas, partes de máquinas e mecanismos podem causar perda de eficiência e até falhas. Por isso, com o aumento do uso desses equipamentos associados aos avanços da eletrônica, surgiu a necessidade de um controle mais eficiente das vibrações geradas. Nos últimos anos, a utilização de materiais e estruturas inteligentes para essa finalidade tem crescido de forma expressiva, podendo ser aplicada em uma ampla faixa de operações. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo exploratório visando reduzir as amplitudes de vibração de uma viga de aço inoxidável em balanço de forma experimental, utilizando transdutores piezoelétricos colados em sua superfície, associados a um circuito shunt de capacitância negativa com resistência elétrica em série. A metodologia utilizada consistiu no estudo do comportamento da viga quando excitada por uma força do tipo impacto, utilizando um martelo de inércia e um acelerômetro em sua extremidade livre. Foram analisados os efeitos causados pelo piezoelétrico colado em sua superfície quando o circuito estiver ativado e não ativado, a fim de verificar se houve redução nas amplitudes de resposta da viga para as duas primeiras frequências naturais. Como esperado, obtivemos uma redução nas amplitudes de aproximadamente 18,7 dB para a primeira frequência natural e de 18,6 dB para a segunda frequência natural, respectivamente. Os resultados obtidos utilizando piezoelétricos associados a circuitos shunt de capacitância negativa se mostram animadores e em sintonia com a literatura consultada.

Palavras-chave: Transdutor piezoelétrico, circuitos shunt de capacitância negativa, atenuação de vibrações.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte das estruturas e equipamentos utilizados na atualidade estão expostos aos efeitos danosos causados pelas vibrações excessivas, seja devido a abalos sísmicos, ações dos ventos, passagem de veículos sobre pontes, catástrofes naturais ou inerentes a sistemas mecânicos, como a vibração de motores a combustão interna, máquinas de lavar, peneiras vibratórias entre outros.

Na grande maioria das vezes, essas vibrações são indesejáveis, pois podem levar ao mau funcionamento das máquinas e equipamentos ou, em casos extremos, até a falha. Para tentar minimizar esses efeitos, tem-se estudado e empregado diversas técnicas diferentes ao longo dos anos, que vão desde Absorvedores Dinâmicos de Vibração (ADV) ao uso de materiais funcionais, como os viscoelásticos.

Mais recentemente tem-se utilizado os chamados materiais inteligentes para essa finalidade. Segundo Leo (2007), materiais inteligentes podem ser definidos como aqueles que exibem acoplamento entre vários domínios físicos (mecânico, elétrico, térmico, etc.). Além disso, também podem desempenhar uma função estrutural, que quando estimulados, podem gerar força e/ou movimento.

Os materiais mais utilizados são os piezoelétricos, as ligas com memória de forma (LMF), os polímeros eletroativos (EAP) e os fluídos eletro e magneto reológicos. No caso dos materiais piezoelétricos, que serão o foco da nossa pesquisa, os tipos mais utilizados são os piezocerâmicos, como o titanato zirconato de chumbo (PZT), e os piezopolímeros, como o polifluoreto de vinilideno (PVDF).

O objetivo principal desse trabalho é avaliar o efeito da incorporação de um elemento ativo numa viga de aço monoengastada em termos de redução das amplitudes de vibração utilizando um transdutor piezoelétrico (QP10W) da fabricante *Midé*, colado em uma das faces da viga e associado a um circuito *shunt* de capacitância negativa com resistência elétrica em série.

Foram estimados também, as formas modais da viga e suas respectivas frequências naturais, onde foi construída a função de resposta em frequência (FRF) de forma experimental. A análise dos gráficos de resposta foi utilizada para quantificar a redução de amplitude para os dois primeiros modos de vibração.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Viga em Balanço

A Figura 1 mostra o modelo da viga engastada a ser considerada, onde F é a força externa aplicada em um ponto, L_f é a distância do engaste ao ponto de aplicação da força e L_b é o comprimento útil da viga.

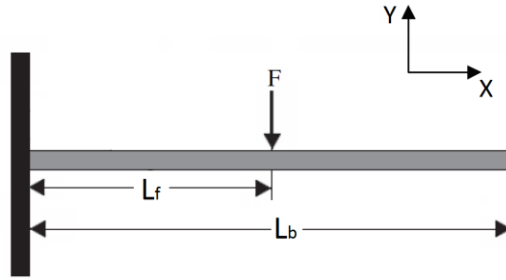


Figura 1. Viga engastada. Fonte: Mineto et. al. (2010).

O método escolhido para a modelagem da viga em balanço é o de Euler-Bernoulli. A equação de movimento governante para uma viga submetida a vibração forçada não amortecida, com condições iniciais iguais a zero é descrita por (Mineto et. al., 2010):

$$\rho A \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + E_b I_b \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = F(t) \quad (1)$$

Onde w é a deflexão, ρ é a densidade, A é a área da sua secção transversal, E_b é o módulo de elasticidade, I_b é o momento de inércia e $F(t)$ é a força externa aplicada a viga. As condições de contorno são:

$$\begin{aligned} w(0, t) = \frac{dw(0, t)}{dx} &= 0, \\ \frac{d^2 w(L_b, t)}{dx^2} = \frac{d^3 w(L_b, t)}{dx^3} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Considerando que a força atuante é uma função harmônica aplicada apenas em um único ponto da viga, como mostrado na Fig. 1, para uma viga uniforme, nós podemos escrever:

$$\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = \frac{F_0}{\rho A} \sin(\omega t) \delta(x - L_f) \quad (3)$$

Onde ω é a frequência, L_f é a posição da força aplicada e c^2 pode ser escrito como:

$$c^2 = \frac{E_b I_b}{\rho A} \quad (4)$$

Uma solução geral para a Equação (3), considerando a viga submetida a vibração livre e utilizando o método da separação de variáveis, pode ser representada pela Eq.,

$$w(x, t) = W(x)T(t) \quad (5)$$

Onde $W(x)$ é a vibração modal da viga em relação à posição e $T(t)$ é o comportamento modal da viga ao longo do tempo. Aplicando a Eq. (5) na Eq. (3) e rearranjando os termos, temos:

$$\frac{c^2}{W(x)} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} = -\frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = a = \omega^2 \quad (6)$$

Onde pode ser mostrado que $a = \omega^2$ deve ser positivo e constante. A Eq. (6) ainda pode ser reescrita como duas equações distintas:

$$\begin{aligned} \frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \beta^4 W(x) &= 0 \\ \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Com $\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI}$. As frequências naturais podem ser obtidas através de β , e apresentadas como,

$$\omega_n = (\beta_n l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Considerando as frequências naturais obtidas pela Eq. (8), o n -ésimo modo de vibração da viga pode ser expresso como:

$$W_n(x) = (\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x) - \left(\frac{\cos \beta_n l + \cosh \beta_n l}{\sin \beta_n l + \sinh \beta_n l} \right) (\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x) \quad (9)$$

2.2. Transdutores Piezoelétricos

A piezeletricidade foi descoberta pelos irmãos Currie na França, em 1880, durante experimentos de laboratório com cristais de quartzo. Após a segunda guerra mundial, houve um grande avanço na tecnologia de obtenção de cerâmicas piezoelétricas sintéticas, o que contribuiu fortemente para o crescimento das pesquisas e aplicações desse tipo de material.

Esses cristais, também conhecidos como transdutores piezoelétricos, na maior parte das vezes são cerâmicas, naturais ou sintéticas. Quando aplicada uma tensão elétrica nas superfícies opostas do material, com uma polarização definida, ele é capaz de gerar uma tensão mecânica (contração ou expansão) em uma determinada direção. Esse comportamento é chamado de efeito inverso. Já o comportamento contrário também é observado, ou seja, quando aplicamos uma tensão mecânica na superfície do material, ele gera uma tensão elétrica, e esse efeito é conhecido como efeito direto.

Essa capacidade de transformação de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, é indicada pelo coeficiente de acoplamento eletromecânico (k_{ij}) para um determinado modo particular ij . Ou seja, quanto maior o k_{ij} , mais energia pode ser convertida de um domínio para outro.

A Figura 2(a) apresenta o sistema completo com o elemento piezoelétrico colado à estrutura e a Fig. 2(b) o modelo simplificado do piezoelétrico acoplado ao circuito *shunt*.

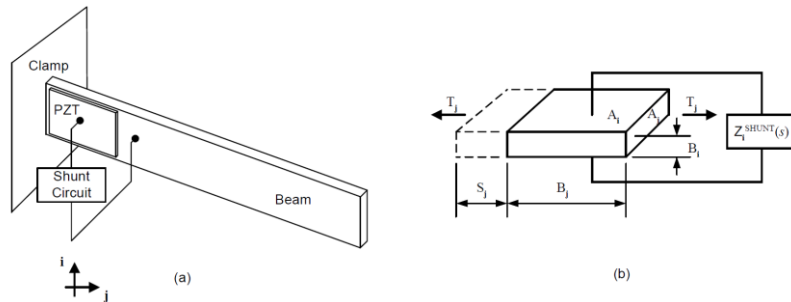


Figura 2. Modelo de um elemento piezoelétrico colado a uma viga e ligado a um circuito shunt. Fonte: Viana e Steffen (2006).

Onde:

- PZT é o piezoelétrico;
- $Z_i^{SHUNT}(s)$ é a impedância elétrica do circuito *shunt* [Ω];
- i e j são as coordenadas que indicam a direção dos vetores;
- T_j é a tensão mecânica [N/m^2];
- A_i e A_j são as áreas das seções transversais [m^2];
- B_i e B_j são as dimensões iniciais do piezoelétrico [m];
- S_j é a deformação adimensional, e
- s é a variável de Laplace.

Segundo Hagood e von Flotow (1991), uma expressão geral que descreve o comportamento dos materiais piezoelétricos de forma linear pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^T & d \\ d^t & s^E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde:

- D é o vetor de deslocamento elétrico [C/m^2];
- E é o vetor de campo elétrico [V/m];
- S é o vetor de deformações do material [adimensional];
- T é o vetor de tensões do material [N/m^2];
- ε é a matriz das constantes dielétricas do material [$C^2/(N.m^2)$];
- s é a matriz de compliança do material [m^2/N];
- d é a constante piezoelétrica do material que relaciona a deformação com a tensão elétrica [m/V].

A Equação (10) em conjunto com as equações básicas de tensão e corrente elétrica permitem obter a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} I \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^{ELE}(s) & s.A.d \\ d^t.B^{-1} & s^E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ T \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$Y^{ELE} = Y_{PZT}^D + Y^{SHUNT} \quad (12)$$

Onde:

- V é o vetor de tensão elétrica [V];
- I é o vetor de corrente elétrica [A];
- B é a matriz diagonal dos comprimentos do piezoelétrico;
- A é a matriz das áreas superficiais, perpendicular ao campo elétrico;
- Y é a admitância elétrica, e
- $Y_{PZT}^D = s.C_{PZT}^T$

2.3. Circuito *Shunt* de Capacitância Negativa

Segundo Moheimani e Fleming (2006), circuitos *shunt* de capacitância negativa constituem uma técnica ativa para controle de vibrações em estruturas. Apesar de capacitores negativos não poderem ser construídos através de componentes passivos e de sua estabilidade não poder ser garantida em circuito fechado, eles são de simples concepção e podem prover um bom desempenho do circuito com uma pequena dependência das frequências de ressonância da estrutura.

A maior desvantagem dessa técnica é a sensibilidade às variações de capacitância do transdutor, onde uma variação de mais de 10% da capacitância pode reduzir significativamente o desempenho do dispositivo e até causar instabilidade no circuito. Devido a essa aparente sensibilidade, o seu uso em aplicações que envolvam uma larga faixa de temperaturas pode ser prejudicado. Uma imagem esquemática exemplificando esse tipo de circuito está mostrada na Fig. 3, abaixo.

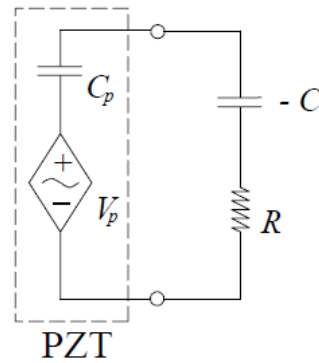


Figura 3. Circuito representativo da capacitância negativa com resistência em série. Fonte: Gonçalves, 2016.

2.3.1. Características do Circuito *Shunt* de Capacitância Negativa

Colocando uma impedância elétrica nos terminais de um transdutor piezoelétrico, que é normalmente colado ou incorporado em uma estrutura mecânica flexível com o objetivo de minimizar as vibrações estruturais, podemos observar os efeitos do amortecimento piezoelétrico do tipo *shunt* (Behrens, 2000). Com as deformações impostas à estrutura, o piezoelétrico também se deforma e gera cargas elétricas em seus terminais.

Essas cargas elétricas ao passar pelo circuito são convertidas em energia térmica por um resistor, onde o mesmo dissipa essa energia para o ambiente em forma de calor. Através do correto dimensionamento da impedância elétrica entre os terminais do transdutor, o circuito acoplado é capaz de aumentar a capacidade de amortecimento mecânico da estrutura.

Segundo Park e Park (2003), esse tipo de circuito gera uma capacitância negativa que possui uma magnitude capaz de cancelar a capacitância interna do elemento piezoelétrico, porém com fases diferentes, para maximizar a dissipação de energia. Portanto, a impedância elétrica de um sistema piezoelétrico/viga se reduz apenas a uma resistência elétrica, que é independente da frequência e faz com que seja possível controlar vários modos de vibração simultaneamente.

Ainda segundo os mesmos autores, podemos verificar através do fator de perda e do módulo de armazenamento, que o piezoelétrico conectado a um resistor em série com a capacitância negativa é mais eficaz em baixas frequências, enquanto um resistor conectado em paralelo é mais eficaz em altas frequências.

Por esse motivo e pelos objetivos propostos, escolhemos utilizar apenas o circuito com resistência em série. As curvas referentes ao fator de perda e ao módulo de armazenamento, para o resistor em série e em paralelo, podem ser observadas nas Fig. 4(a) e 4(b), respectivamente.

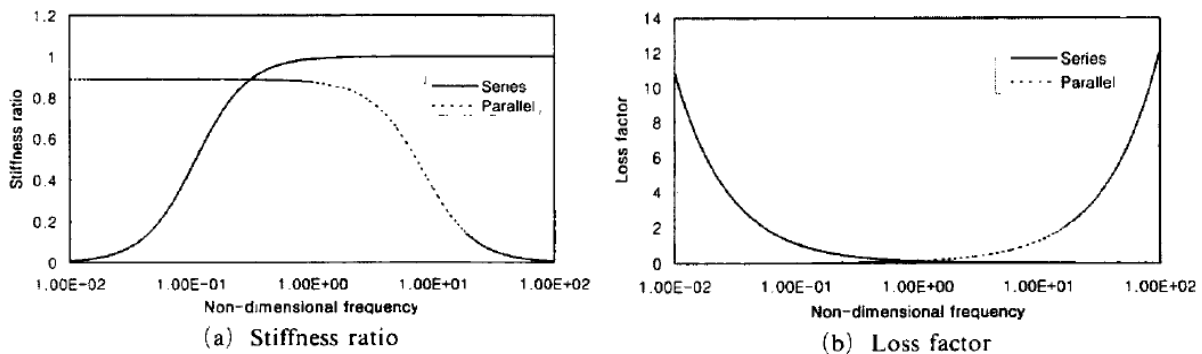


Figura 4. Módulo de armazenamento (*stiffness ratio*) e fator de perda (*loss factor*) para o circuito *shunt* de capacitância negativa em série e em paralelo. Fonte: Park and Park, 2003.

Variando-se os valores de frequência e simulando a Fig. 4 em função da resistência elétrica, apenas para o caso da resistência elétrica em série, temos que quanto maior a frequência natural, menor é o valor necessário de resistência para se obter um bom valor do fator de perda.

2.3.2. Implementação do Circuito

Os capacitores negativos são dispositivos ativos, portanto eles não podem ser implementados por componentes passivos. Para isso, fazemos uso dos conversores de impedância negativa (NIC). Como ilustrado na Fig. 5, um NIC consiste em um amplificador operacional (op-amp) simples, dois resistores R_1 e R_2 , e a impedância com o valor a ser cancelado.

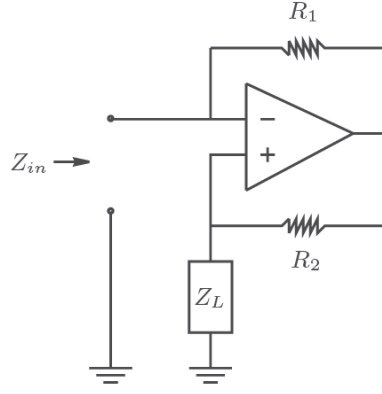


Figura 5. Conversor de impedância negative sugerido. A impedância vista dos terminais de entrada é proporcional a $-Z_L$. Fonte: Behrens et. al. (2011).

Podemos ver que a impedância elétrica de entrada $Z_{in}(s)$ é igual a:

$$Z_{in}(s) = -\frac{R_1}{R_2} \cdot Z_L \quad (13)$$

Se escolhermos $Z_L(s) = (\hat{R} \cdot C \cdot s - 1)/(C \cdot s)$, isto é a capacitância C , a razão de resistências pode ser variada para um ajuste fino do valor da capacitância negativa. Considerando ainda que $R_1 = R_2$ e substituindo na Eq. (13), temos que:

$$Z_{in}(s) = \frac{R \cdot s + \left[\frac{1}{C} \left(\frac{R}{\hat{R}} - 1 \right) \right]}{s + \left(\frac{1}{\hat{R} \cdot C} \right)} \quad (14)$$

Moheimani e Fleming (2006) afirmam que algumas dificuldades práticas encontradas, como a polarização da corrente e o defasamento da tensão, são normalmente resolvidas colocando uma grande resistência elétrica ($\hat{R}$) em paralelo com Z_L . Uma resistência térmica também tem sido utilizada para resolver alguns problemas resultantes e para termos um parâmetro de ajuste. Por esse motivo, para que a Eq. (12) torne-se estável é necessário que $C > C_p$ e $\hat{R} \gg R > 0$.

Para que $Z_{in}(s)$ seja igual à $Z_L(s)$, precisamos adicionar um resistor em paralelo com o PZT, de forma que ambas as impedâncias possuam a mesma magnitude. O circuito proposto foi construído como mostrado na Fig. 6.

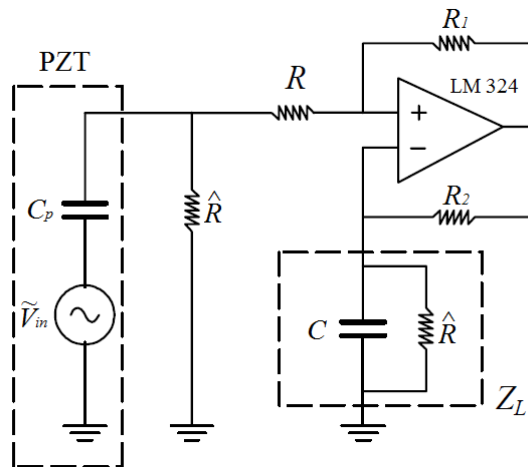


Figura 6. Circuito utilizado com a capacitância negativa presente. Fonte: Gonçalves, 2016.

Ressaltando que a resistência R é utilizada como elemento dissipador de energia por efeito Joule devido à corrente elétrica gerada no transdutor quando a estrutura a qual está acoplado se desloca. Todos os componentes elétricos utilizados nesse trabalho e seus respectivos valores estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros do circuito de capacitância negativa.

Componentes do Circuito	Valor
$R_1 = R_2$	10 k Ω
$\hat{R}$	3,3 M Ω
R	100 Ω
C_p	85 nF
C	90 nF

Segundo Hagood e von Flotow (1991), definimos a impedância mecânica total adimensional ($\bar{Z}_{jj}^{MEC}$) do sistema em função da impedância elétrica total adimensional ($\bar{Z}_{jj}^{ELE}$) e do fator de acoplamento eletromecânico (k_{ij}) no domínio de Laplace como sendo:

$$\bar{Z}_{jj}^{MEC}(s) = \frac{\bar{Z}_{jj}^{SHUNT}(s)}{\bar{Z}_{jj}^D(s)} = \frac{1 - k_{ij}^2}{1 - k_{ij}^2 \cdot \bar{Z}_{jj}^{ELE}(s)} \quad (15)$$

Assim, a equação final simplificada para a função de resposta em frequência (FRF) de um sistema com um grau de liberdade e com um piezoelétrico acoplado à estrutura, pode ser expressa da seguinte forma:

$$H(s) = \frac{s}{s^2 \cdot m_r + s \cdot \bar{Z}_{jj}^{MEC}(s) + k_r} \quad (16)$$

Onde m_r e k_r são a massa modal e a rigidez modal relacionada com o modo r de vibrar.

3. METODOLOGIA

3.1. Modelo Físico e Especificações

A viga de aço inoxidável foi fixada em balanço, com uma extremidade livre e a outra engastada, onde suas dimensões, com o transdutor colado a estrutura, estão apresentadas na Fig. 7(a) e suas propriedades descritas na Tab. 2.

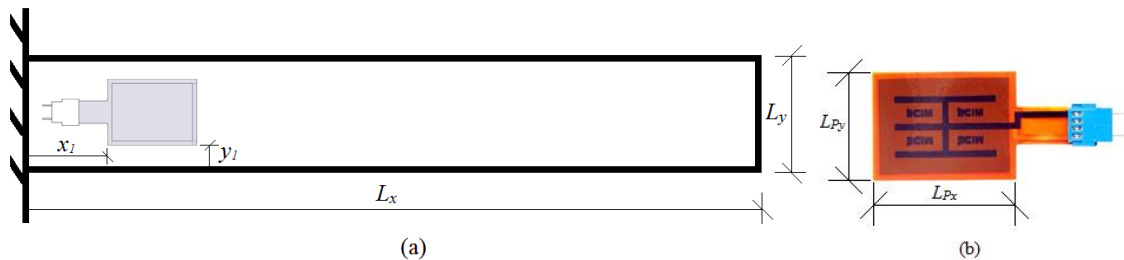


Figura 7. (a) Modelo da viga; (b) transdutor piezoelétrico utilizado (QP10W). Fonte: www.mide.com

Tabela 2. Parâmetros da viga.

Propriedade	Símbolo	Valor
Comprimento	L_x	0,250 m
Largura	L_y	0,05 m
Espessura	h	0,001 m
Módulo de Young	E	155x10 ⁹ Pa
Coefficiente de Poisson	ν	0,3

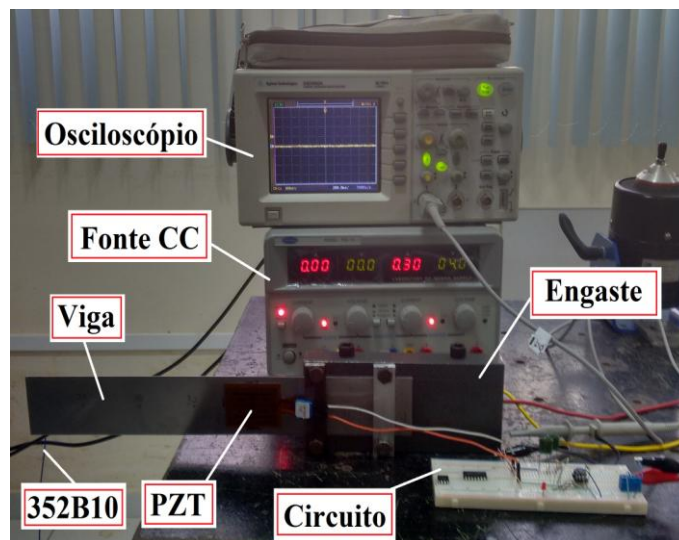
O transdutor piezoelétrico utilizado é o modelo QP10W, composto de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) e produzido pela empresa Midé®, como mostrado na Fig. 8(b), com suas respectivas dimensões e propriedades apresentadas na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros do transdutor piezoelétrico.

<i>Propriedade</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Localização na direção x	x_1	0,02 m
Localização na direção y	y_1	0,006 m
Comprimento em x	L_{Px}	0,0508 m
Comprimento em y	L_{Py}	0,0381 m
Espessura	h_p	0,000381 m
Capacitância	C_p	$85 \times 10^{-9} F$
Constante de Deformação	d_{31}	$-190 \times 10^{-12} m/V$
Fator de Acoplamento Eletromecânico	k_{31}	0,36
Constante de Tensão	g_{31}	$-11,3 \times 10^{-3} V.m/N$

3.2. Abordagem Experimental

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Vibrações e Instrumentação (LVI) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Todos os testes foram realizados sobre uma mesa inercial, com a viga submetida a uma excitação do tipo impacto, realizada por um martelo de impacto (PCB 086C01) e aquisitados por um acelerômetro (PCB 352B10), conectados a um Analisador Dinâmico de Sinais (35670A) da marca *Agilent®* e posteriormente tratados no *Matlab®*. Parte do aparato experimental utilizado está apresentada na Fig. 8.

**Figura 8. Parte do aparato experimental utilizado.**

O acelerômetro estava posicionado na extremidade livre da viga, a uma distância de aproximadamente 245 mm do engaste. E a excitação (impacto) foi realizada a uma distância de 150 mm do engaste, que foi onde obtemos a melhor resposta do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados Analíticos

A título de comparação, foram calculados os valores das duas primeiras frequências de ressonância da estrutura, utilizando a teoria apresentada na seção 2.1 através da Eq. (8). Já os modos de vibração da viga foram determinados através da Eq. (9). Os valores encontrados para as duas primeiras frequências naturais estão apresentados na Tab. 4, e os modos de vibração da viga referentes a tais frequências estão apresentados na Fig. 9.

Tabela 4. Frequências naturais da estrutura.

<i>Frequência Natural</i>	<i>Valor</i>
1º Modo de Vibração	12,51 [Hz]
2º Modo de Vibração	78,42 [Hz]

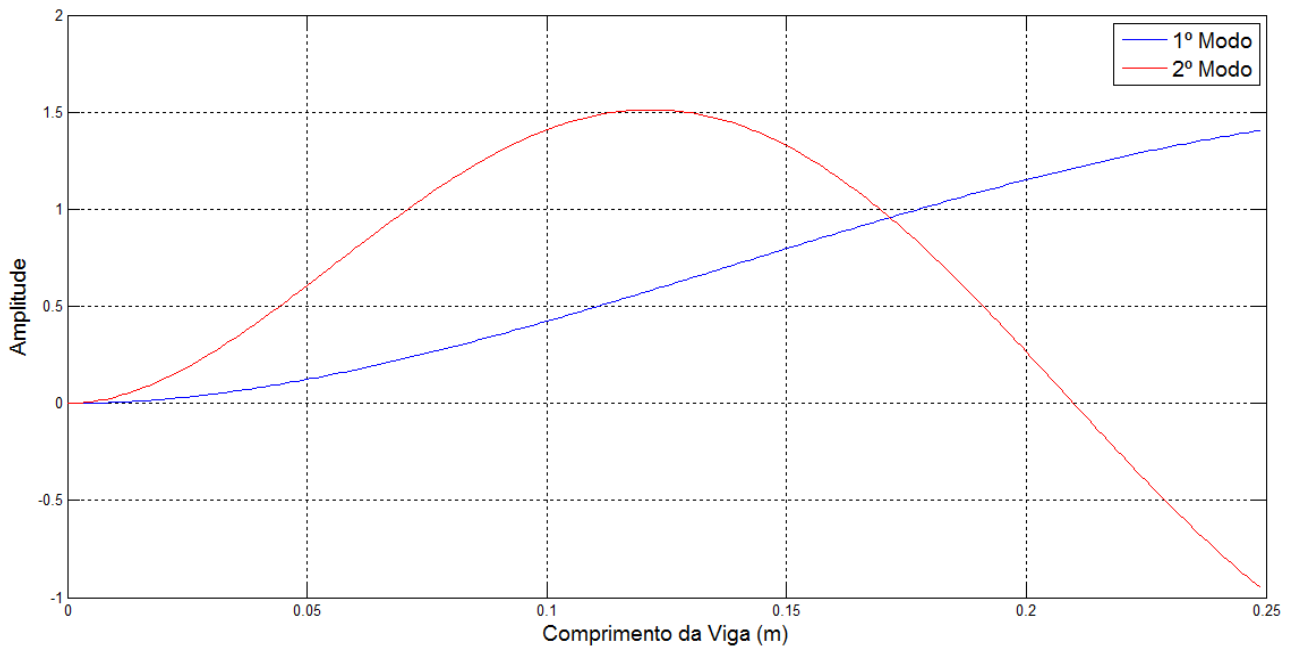


Figura 9. Primeiro e segundo modos de vibração da viga.

4.2. Resultados Experimentais

A Fig. 10 ilustra a superposição de duas respostas no tempo (viga não ativada e ativada com PZT), onde é possível visualizar a redução das amplitudes em termos da aceleração.

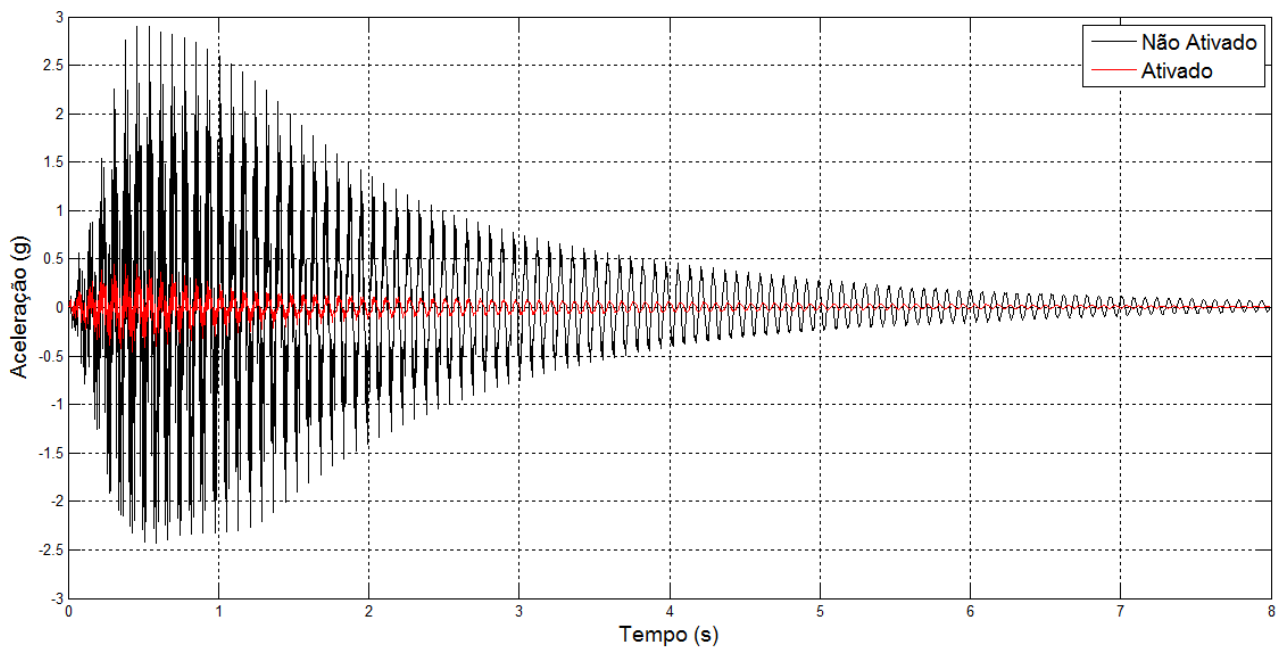


Figura 10. Respostas do sistema no tempo, com o circuito ativado e não ativado.

Na Figura 11 são apresentados os gráficos experimentais das FRF da estrutura com o transdutor acoplado (em duas faixas de frequência), onde comparam-se os resultados com o circuito elétrico não ativado (*open loop*) e ativado (*closed loop*).

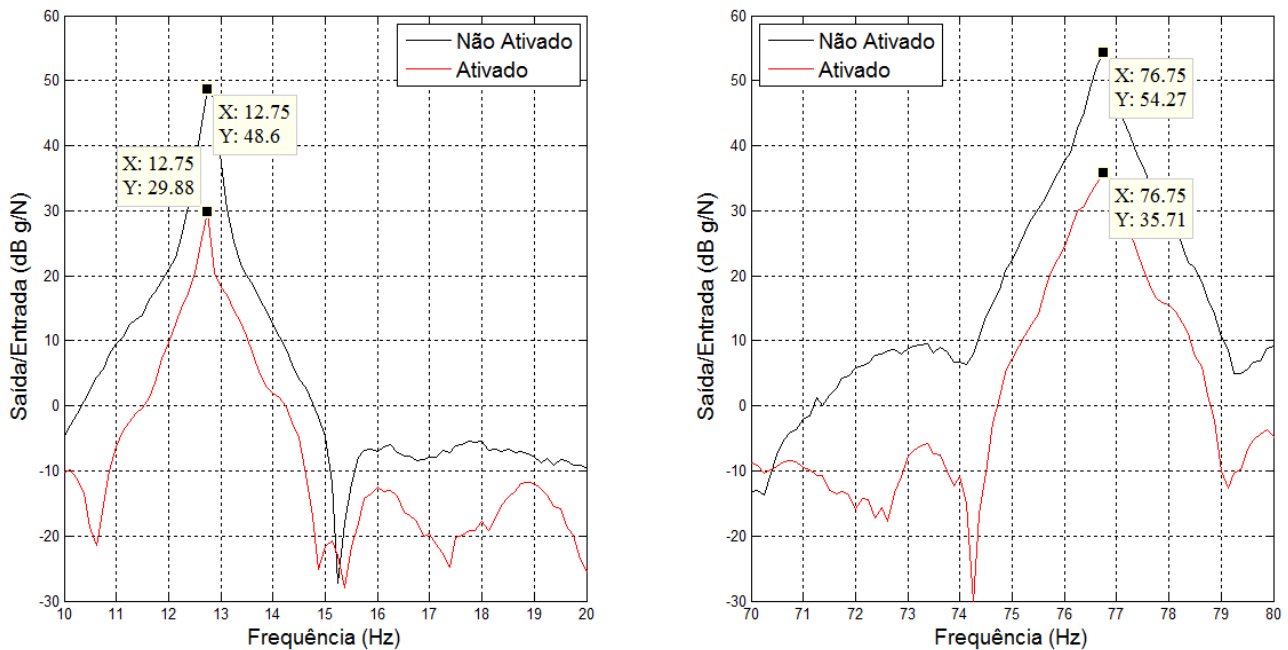


Figura 11. Gráfico da FRF da viga com o circuito ativado e não ativado, comparando as duas primeiras frequências naturais do sistema.

4.3. Comparação de Resultados

Como apresentado nas figuras anteriores, vemos claramente que houve uma redução significativa das amplitudes de resposta do sistema, quando o circuito está ativado. Essas reduções foram da ordem de 18,7 dB e de 18,6 dB para as duas primeiras frequências naturais da estrutura, respectivamente. Esses resultados corroboram com a visualização no domínio do tempo (Fig. 10), que representa mais de 70 % de redução.

Outra característica desse tipo de controle é que as frequências naturais não são alteradas pelo acionamento do circuito, ou seja, a rigidez da estrutura não é alterada. E, portanto, a redução das amplitudes se dá pelo incremento de seu amortecimento.

5. CONCLUSÕES

Com os resultados apresentados neste trabalho, fica comprovada a eficiência e a robustez do nosso sistema de controle, capaz de atenuar mais de uma frequência natural de modo autônomo e independente. Por ter construção simples e apresentar uma ampla faixa de atuação, esse sistema pode ser aplicado em diversas estruturas, desde que bem dimensionado.

Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e em concordância com os valores apresentados na literatura, com uma redução nas amplitudes dos picos de ressonância de 1,7 dB e de 18,6 dB para a primeira e segunda frequências naturais, respectivamente. Portanto, a estratégia de controle, o circuito utilizado e a implementação do NIC foram executados corretamente e conseguiram atingir os objetivos esperados.

6. AGRADECIMENTOS

Aos Laboratórios de Vibração e Instrumentação (LVI) e ao Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da UFCG. Às agências de fomento, CAPES e CNPq pelo incentivo dado na forma de bolsas de estudo e projetos aprovados.

7. REFERÊNCIAS

- Behrens, S. "Passive and Semi-active Vibration Control of Piezoelectric Laminates", 2000. 101 p. Tese (Mestrado). The Department of Electrical and Computer Engineering, University of Newcastle, Australia, 2000.
- Behrens, S.; Fleming, A. J.; Moheimani, S. O. R. "New Method for Multiple-mode Shunt Damping of Structural Vibration using a Single Piezoelectric Transducer". *Smart Structures and Materials*, v. 4331, p. 239-250, 2001.
- Gonçalves, A. G. S. "Controle Ativo de Vibrações em uma Estrutura com 2 GDL Utilizando Transdutores Piezoelétricos Associados a Circuitos Shunt de Capacitância Negativa", 2016. 132 p. Dissertação (Mestrado). Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2016.

- Hagood, N. W.; Von Flotow, A. "Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks". Journal of Sound and Vibration, v. 146, p. 243-268, 1991.
- Leo, D. J. Engineering Analysis of Smart Material Systems, 2007. Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia. Editora John Wiley & Sons, INC., p 569.
- Mineto, A. T.; Braun, M. P. Z.; Navarro, H. A.; Varoto, P. S. "Modeling of a Cantilever Beam for Piezoelectric Energy Harvesting". Proceedings of the Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications, p. 599-605, 2010.
- Moheimani, S. O. R.; Fleming, A. J. "Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping", 2006. School of Electrical Engineering and Computer Science, University of Newcastle, Australia. Editora Springer, p. 279.
- Park, C. H.; Park, H. C. "Multiple-Mode Structural Vibration Control Using Negative Capacitive Shunt Damping". KSME International Journal, v. 17, n. 11, p. 1650-1658, 2003.
- Viana, F. C. A.; Steffen, V. "Multimodal Vibration Damping through Piezoelectric Patches and Optimal Resonant Shunt Circuits". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 28, n. 3, p. 293-310, 2006.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ATTENUATION OF VIBRATIONS ON A BEAM USING NEGATIVE CAPACITANCE SHUNT CIRCUIT WITH RESISTOR IN SERIES COUPLED TO A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

COM-2016-0645

Abstract: *The vibrations associated with structures, parts of machines and mechanisms can cause loss of efficiency and even failures. So, with the increasing use of these equipments associated with advances in electronics, the need arose for a more efficient control of the generated vibrations. In recent years, the use of smart materials and structures for this purpose has increased significantly, can be applied in a wide range of operations. This work aims to conduct an exploratory study to reduce the vibration amplitudes of a stainless steel cantilever beam experimentally using piezoelectric transducers bonded on their surface, associated with a negative capacitance shunt circuit with electrical resistance in series. The methodology used consisted of the study of behavior of the beam when excited by an impact type force, using an inertia hammer and an accelerometer on its free end. The effects caused by the piezoelectric pasted on its surface when the circuit is activated and not activated were analyzed in order to check if there was a reduction in the beam response amplitudes for the first two natural frequencies. As expected, there was a reduction in amplitudes of approximately 18.7 dB for the first natural frequency and 18.6 dB for the second natural frequency, respectively. The results obtained using piezoelectric shunt circuits associated with negative capacitance are shown encouraging and in harmony with the literature.*

Keywords: *Piezoelectric transducer, negative capacitance shunt circuit, attenuating vibrations.*