

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE CIRCUITOS *SHUNT* PARA CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÕES

Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini-Vicente, LMest/INCT-EIE, brunozv@mec.ufu.br
Helder Barbieri Lacerda, LMest/INCT-EIE, helder@mecanica.ufu.br
Roberto Mendes Finzi Neto, LMest/INCT-EIE, finzi@mecanica.ufu.br
Antonio Marcos Gonçalves de Lima, LMest/INCT-EIE, amglima@mecanica.ufu.br

Resumo. Na atenuação passiva de vibrações, o uso de impedâncias sintéticas para ressonar com um problema típico de vibração mecânica é a maneira mais simples de evitar o grande volume e peso de indutores tradicionais, que resulta da necessidade de indutores com dezenas ou centenas henry quando o processo de casamento de impedância entre as partes elétricas e mecânicas é realizado, sendo crítico em baixa frequência, cenário da dinâmica mecânica. Para construir tais indutores sintéticos, diversos esquemas elétricos com amplificadores operacionais podem ser usados, oferecendo altos valores de henrys em baixas frequências e com lei de formação dependendo apenas dos resistores e capacitores ligados a esses amplificadores. Sendo assim, no presente trabalho realizou-se a avaliação experimental de um circuito empregando um indutor sintético simples, configurável entre arranjos série e paralelo, aplicando três tipos de circuitos shunts descritos na literatura, sintonizados para atenuar três modos de uma estrutura. Os resultados foram organizados de modo a fornecer um panorama geral da capacidade de atenuação, evidenciando o impacto das sintonias do circuito para cada modo de vibrar. Dessa maneira, os experimentos indicaram por exemplo que, para o circuito avaliado, a sintonia de maior atenuação é o Hagood Paralelo, sendo o nível de atenuação maior para o segundo modo. De modo geral, os resultados apontam para uma capacidade real de atenuação, que pode ser ainda melhorada a partir do uso de outros circuitos mais adaptados, presentes na literatura.

Palavras chave: controle passivo de vibrações, avaliação experimental, circuitos passivos shunt, indutor sintético.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do controle passivo de vibrações em estruturas inteligentes, trabalhos como o de Moheimani (2003) descrevem os avanços teóricos relacionados ao uso de circuitos elétricos acoplados a materiais piezelétricos¹ para mitigação de vibrações. No que tange aos circuitos passivos, nos quais não há inserção de energia de forma direta para o controle de vibrações, uma das possibilidades reside no uso de impedâncias elétricas sintonizadas para ressonar com a impedância elétrica gerada por um piezelétrico acoplado à estrutura, de modo a maximizar o efeito de transferência de energia via acoplamento eletromecânico. Para tal, trabalhos como os de Hagood e von Flotow (1991) e Wu (1996) apresentaram o desenvolvimento de teorias para circuitos passivos e demonstraram a necessidade de grandes valores de indutância (valores acima de mH) para equilibrar a natureza capacitiva da pastilha piezelétrica em baixa frequência, o que na prática só é viável através do uso de indutores sintéticos, já que métodos tradicionais de construção de indutores requerem grandes volumes e adição proibitiva de massa (Sedra, 2009). Do ponto de vista experimental, trabalhos como o desenvolvido Behrens *et al.* (2003), apresentaram o uso de indutores sintéticos em esquemas de controle de vibrações, mas pouca ou nenhuma discussão acerca das diferentes topologias, desempenho modo a modo ou nível de atenuação são expostos. Dessa maneira, o presente trabalho apresenta a avaliação experimental do desempenho de um circuito *shunt* monomodal para atenuação de vibrações, em três tipos de topologias, no qual uma viga de alumínio engastada-livre foi usada como estrutura hospedeira para um piezelétrico acoplado ao circuito *shunt*, ilustrado na Fig.(1).

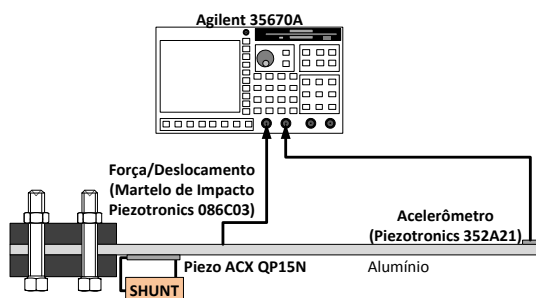


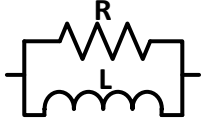
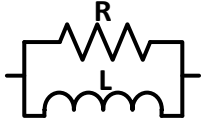
Figura 1: Esquemático dos ensaios (à esquerda) e Montagem Experimental (direita).

¹ Junção dos termos gregos *piezein* (pressão) e *electron* (âmbar, antiga fonte de cargas elétricas) os piezelétricos são materiais capazes de converter pressão mecânica em tensão elétrica e vice-versa, constituindo um importante transdutor para interfaces mecânicas e elétricas (ANSI-IEEE, 1987).

2. CIRCUITOS *SHUNTS* AVALIADOS

Para desempenhar o papel de circuito *shunt*, conforme apresentado na Fig. (1), três topologias de circuitos e suas respectivas sintonias foram testadas, apresentadas na Tab. (1):

Tabela 1 - Topologias e respectivas sintonias dos circuitos *shunts* avaliados.

TOPOLOGIAS		SINTONIA de R e L
	Hagood e von Flotow Série (Hagood e von Flotow, 1991)	$R = \frac{\sqrt{2}K_{ij}}{C_{PZT}\omega_n(1 + K_{ij}^2)} \quad L = \frac{1}{C_{PZT}(1 + K_{ij}^2)\omega_n^2}$
	Hagood e von Flotow Paralelo (Hagood e von Flotow, 1991)	$R = \frac{1}{\sqrt{2}K_{ij}C_{PZT}\omega_n} \quad L = \frac{1}{C_{PZT}\left(1 - \frac{K_{ij}^2}{2}\right)\omega_n^2}$
	Wu e Bicos Paralelo (Wu e Bicos, 1996)	$R = \frac{1}{2.828\pi f_s C_{PZT} K_{ij}} \quad L = \frac{1}{C_{PZT}(2\pi f_s)^2 \left(1 - \frac{K_{ij}^2}{2}\right)}$

Onde $K_{ij} = \sqrt{f_n^2 - f_s^2}/f_s$ é o coeficiente generalizado de acoplamento eletromecânico (Wu e Bicos, 1996), C_{PZT} é a capacitância do piezelétrico, ω_n é a frequência natural em radianos (e f_n em hertz) para o caso do piezelétrico em circuito aberto e f_s é a frequência natural em hertz para o piezoelétrico em curto-circuito.

3. INDUTOR SINTÉTICO

As topologias a serem aplicadas como circuito *shunt* descritas na Tab.(1) foram construídas utilizando como indutor sintético o esquema descrito por Tellegen (1948), denominado como *gyrator*, ilustrado na Fig.(2). Nesse circuito, o amplificador operacional, o capacitor e os resistores associados provocam, nos terminais do esquema, o deslocamento de quase 90° da fase da tensão, resultando na função requerida de um indutor. Além disso, o valor de indutância nesse circuito consiste em $L=R_1R_2C_3$, conforme a Fig.(2):

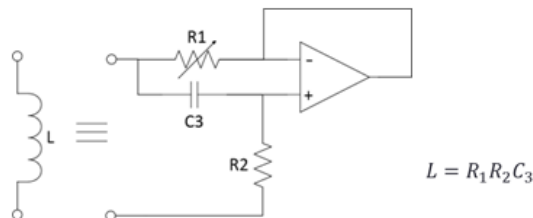


Figura 2 - Indutor sintético baseado em *gyrator*, conforme Tellegen (1948).

A fim de atender os arranjos série e paralelo descritos na Tab. (1) e incorporando o indutor sintético da Fig. (2), que deve possuir R_l ajustável, incorporou-se ao projeto do circuito eletrônico terminais para que fosse possível ligar em série ou em paralelo o resistor R (também ajustável) e, além disso, ajustar o resistor R_l conforme a Fig. (3):

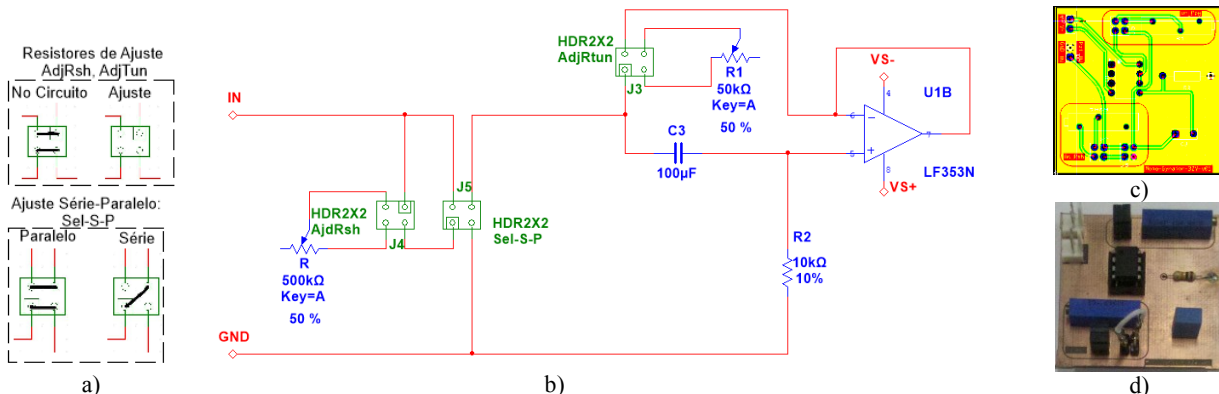


Figura 3 - Projeto eletrônico do circuito *shunt gyrator* reconfigurável: a) Detalhe dos resistores de ajuste; b) Esquema do *shunt* monomodal; c) Projeto do PCB; d) PCB pronto.

4. SINTONIA DOS CIRCUITOS SHUNTS

Para a determinação dos parâmetros R e L para cada topologia de circuito *shunt*, obteve-se experimentalmente as FRFs no intuito de observar as frequências naturais para circuito aberto (f_n), e curto-circuito (f_s), ilustrados na Fig. (4):

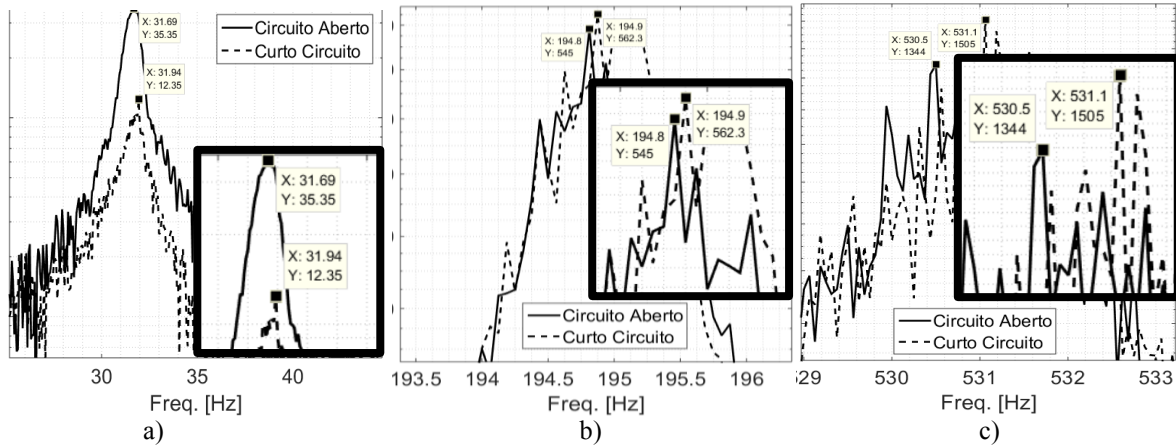


Figura 4 - FRFs da estrutura com piezo para circuito aberto e curto-circuito: a) 1° Modo, b) 2° Modo, c) 3° Modo.

A seguir, na Tab. (2), as frequências de circuito aberto e curto-circuito observadas na Fig. (4) e os valores dos componentes para cada sintonia da Tab. (1), com capacitância do piezelétrico ACX QP15N igual a $C_{PZT} = 75,3\text{nF}$:

Tabela 2 - Valores dos parâmetros R e L para sintonia de circuitos shunt.

Entradas	Hagood e von Flotow Serie		Hagood e von Flotow Paralelo		Wu e Bicos Paralelo	
	f_n [Hz]	f_s [Hz]	R [Ω]	L [H]	R [Ω]	L [H]
1° Modo	31,690	31,940	1,160E+04	329,823	3,777E+05	337,598
2° Modo	194,800	194,900	4,910E+02	8,856	2,395E+05	8,869
3° Modo	530,500	531,100	2,671E+02	1,193	5,929E+04	1,197

Na Tab. (3) são apresentados os valores para ajuste do resistor R_l de maneira a atender as indutâncias especificadas, modo a modo, para as três sintonias investigadas:

Tabela 3 - Ajuste do resistor R_l para obtenção das indutâncias para cada topologia de circuito *shunt*, modo a modo.

Componentes Fixos	Ajuste de R_l para $L = R_1 R_2 C_3$			
	Hagood e von Flotow Serie		Hagood e von Flotow Paralelo	
	R_2 [Ω]	C_3 [F]	R_1 [Ω]	R_1 [Ω]
1° Modo	1,000E+04	1,000E-06	3,298E+04	3,376E+04
2° Modo	1,000E+04	1,000E-06	8,856E+02	8,869E+02
3° Modo	1,000E+04	1,000E-06	1,193E+02	1,197E+02

De posse dos valores para os resistores ajustáveis R (resistência do *shunt*) e R_l (resistor de ajuste do indutor sintético), realizou-se a obtenção experimental das FRFs usando os circuitos *shunts*, nos quais os procedimentos experimentais são explicitados na Fig. (5). Os testes foram realizados a 24°C, sendo a FRF obtida via excitação por impacto e leitura da aceleração, usando 30 médias e 1600 pontos de aquisição, em uma banda de 0 a 800 Hz.

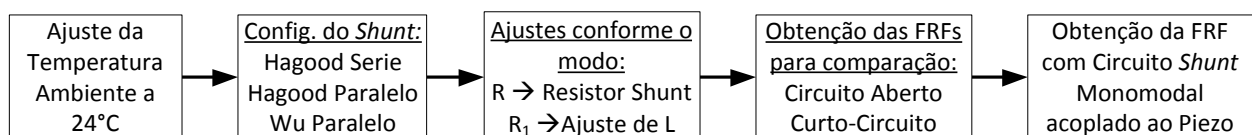


Figura 5 - Sequência do procedimento experimental realizado.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Seguindo o procedimento descrito na Fig. (5), foram avaliados cada um dos circuitos *shunts* e suas sintonias, descritos na Tab.(1), para cada um dos três primeiros modos de vibrar da estrutura. A fim de se realizar um comparativo para a atenuação inserida de forma a diminuir o efeito das condições ambientais, deve-se destacar que para cada combinação modo/topologia foram obtidos, além da FRF da estrutura com o circuito *shunt* acoplado, as FRFs para o piezelétrico em circuito aberto e em curto-circuito. Dessa maneira, a Fig. (6) ilustra, para o primeiro modo, o efeito do circuito *shunt* sobre a amplitude da FRF para as topologias Hagood Série e Wu Paralelo, onde se pode notar que a primeira topologia introduz 12,7% de atenuação e a segunda, 6,35%, atenuação essa em relação à configuração da estrutura com piezelétrico em circuito aberto.

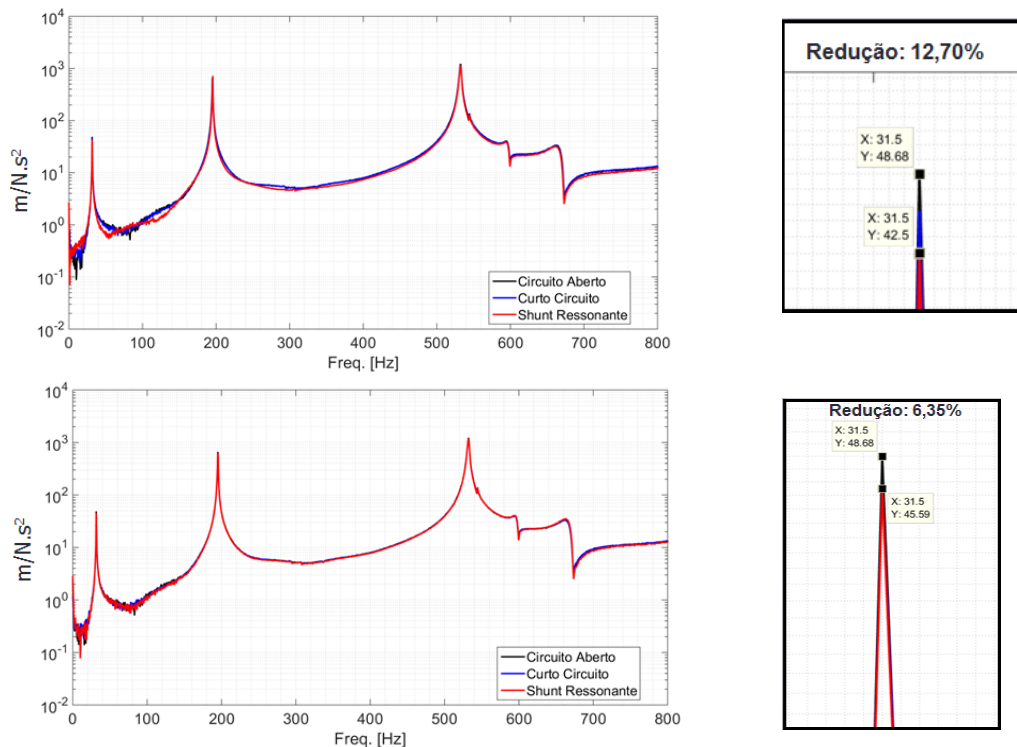


Figura 6 - Exemplos de FRFs obtidas para duas combinações modos/topologias no primeiro modo: acima Topologia Hagood e von Flotow Série e detalhe; abaixo Topologia Wu e Bicos Paralelo e detalhe.

A seguir, a Tab. (4) apresenta os resultados obtidos para todas as combinações modos/topologia em análise. Nota-se que a configuração de melhor desempenho para o 1º modo foi a Hagood Série, enquanto a Hagood Paralelo e Wu Paralelo apresentam resultados semelhantes para o 2º modo e a Wu Paralelo é superior para o 3º modo. Tais resultados sugerem que para modos próximos a 30Hz a melhor topologia é a Hagood Série, enquanto que para modos acima de 200Hz deve-se considerar o uso da topologia Wu Paralelo, sendo a Hagood Paralelo a solução de compromisso.

Tabela 4 - Atenuações percentuais introduzidas para cada combinação modo/topologia.

Hagood e von Flotow Série				Hagood e von Flotow Paralelo				Wu e Bicos Paralelo			
	Circuito Aberto	Shunt Resson.	Redução		Circuito Aberto	Shunt Resson.	Redução		Circuito Aberto	Shunt Resson.	Redução
Modo1	48,68	42,5	12,70%	Modo1	48,68	43,42	10,81%	Modo1	48,68	45,59	6,35%
Modo2	448,4	406,3	9,39%	Modo2	420,7	355,4	15,52%	Modo2	422,7	357,4	15,45%
Modo3	965,2	916,9	5,00%	Modo3	967,2	897,9	7,17%	Modo3	957,2	875,1	8,58%

Observando os valores médios presentes na Fig. (7), pode-se afirmar que a topologia de melhor atenuação geral é a Hagood Paralelo, seguida de perto pela Wu Paralelo. Entretanto, analisando em conjunto a Fig. (7), com a Tab. (4), nota-se que a topologia Hagood Paralelo fornece maior atenuação para modos até 200Hz, enquanto a Wu Paralelo tem melhor desempenho a partir dessa frequência. Analisando a atenuação média inserida por modo, tem-se mais atenuação média no 2º modo, resultado direto do forte desempenho das configurações Hagood Paralelo e Wu Paralelo. Além disso, sobre o desempenho inferior da topologia Hagood Série, pode-se afirmar que problemas de resistência parasita podem estar presentes no circuito, o que já foi relatado e investigado no trabalho de Viana e Steffen Jr. (2006).

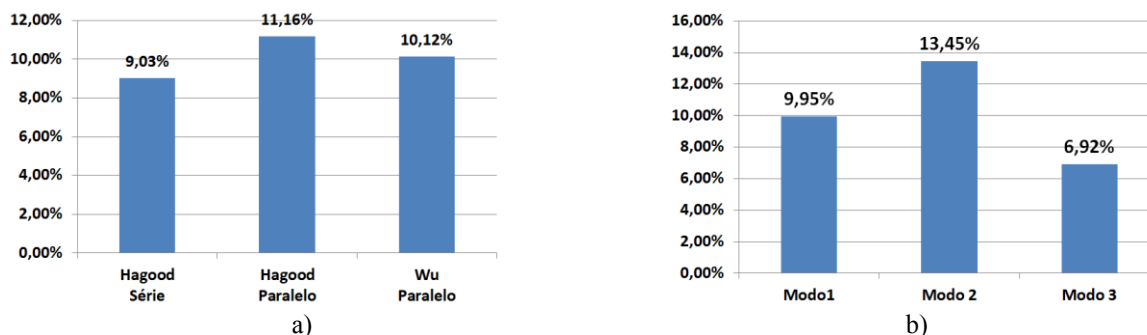


Figura 7 - Atenuações médias inseridas: a) por topologia de circuito e b) por modo de vibração.

6. CONCLUSÕES

Mediante o exposto, pode concluir que o modo de interesse, ou seja, a faixa de frequência, possui maior influência na decisão do tipo de circuito/sintonia do que a própria topologia de circuito em si, como o discutido e visto na Fig. (7).

7. REFERÊNCIAS

- ANSI-IEEE 176 (1987), Standard on Piezoelectricity.
- Behrens, S. Moheimani, S. O. R., Fleming, A. J., 2003, Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller, *Journal of Sound and Vibration* 266 (2003) 929–942.
- Hagood, N. W. and Flotow, A. H. V., Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 146, pp. 243-268, 1991.
- Moheimani, S. O. R., “A Survey of Recent Innovations in Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Transducers”. *Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 4, July 2003, IEEE.
- Sedra, A. S.; Smith, K. C. *Microeletrônica*. 6ª Edição / Editora: Oxford, ISBN13: 9780195323030, 2009.
- Tellegen, B. D. H. (April 1948). "The gyrator, a new electric network element". *Philips Res. Rep.* 3: 81–101.
- Viana, F.A.C., Steffen JR., V., “Multimodal vibration damping through piezoelectric patches and optimal resonant shunt circuits”. *Journal of the Brazilian Society of Mech. Sciences and Engi.*, Vol.28, No.3, pp.293–310, 2006.
- Wu, S. Y., “Piezoelectric shunts with parallel R-L circuit for structural damping and vibration control,” in *Proc. SPIE Smart Structures and Materials, Passive Damping and Isolation*, vol. 2720, SPIE, Mar. 1996, pp. 259–269.

8. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos de Bruno G. G. L. Zambolini-Vicente, ao CNPq pela concessão de bolsa de pesquisador e o apoio financeiro aos projetos de pesquisa de A.M.G. de Lima. À FAPEMIG e pelo apoio financeiro aos projetos de pesquisa de A.M.G. de Lima.

9. ABSTRACT

Abstract. In the passive vibration attenuation, the use of synthetic impedances to resonate with a typical mechanical vibration problem is the simplest way to avoid the large volume and weight of traditional inductors, that results from the need of inductors with dozens or hundreds henry when the matching frequency process between electrical and mechanical parts is carried out, being critical in low-frequency, scenario of mechanics dynamics. In order to construct those simulated inductors, electric schemes with operational amplifiers are used, that deliver high values of henrys with formation law depending of resistors and capacitors connected to these amplifiers. Therefore, in this study it was held the experimental evaluation of a circuit employing a simple synthetic inductor, configurable between serial and parallel arrangements, applying three types of shunts circuits described in the literature, tuned to mitigate three modes of a structure. The results were organized to provide an overview of the attenuation capacity, showing the impact of circuit tunings for each vibrate mode. Thus, the experiments indicate, for example, that the tuning greater attenuation is Hagood Parallel and the largest attenuation level for the second mode. Overall, the results point to a potential attenuation capability, that can be further enhanced from the use of other circuits more adapted in the literature.

Palavras chave: passive vibration control, experimental evaluation, passive shunt circuits, synthetic inductor.

10. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.