

ANÁLISE DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE ESTRUTURAS PIEZELÉTRICAS COM CIRCUITOS SHUNT NÃO LINEARES

Victor Quitzau dos Santos, victor.quitzau@usp.br

Jaime Alberto Mosquera-Sánchez, jamosquera@usp.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trab. São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, 13566-390, São Carlos - SP, Brasil

Resumo. O presente trabalho tem como objetivo investigar experimentalmente a interação entre circuitos shunt de natureza não linear e estruturas piezolétricas acopladas, com foco no controle de vibrações em sistemas mecatrônicos. Para isso, foi desenvolvido um arranjo experimental composto por uma estrutura do tipo viga, com condição de contorno livre-engastada, excitada harmonicamente e instrumentada com uma célula piezolétrica, à qual foram acoplados circuitos shunt previamente reportados na literatura. Foram analisadas as respostas em frequência dos circuitos nas configurações de ressonadores do tipo Duffing e nonlinear energy sink (NES), introduzindo-se diferentes níveis de não linearidade ao sistema. Os resultados experimentais evidenciaram alterações significativas no comportamento ressonante da estrutura, incluindo a atenuação das amplitudes de oscilação do sistema e a indução de efeitos de hardening e histerese na resposta em frequência do mesmo. Embora os resultados obtidos confirmem a eficiência dos circuitos shunt estudados e contribuam para um melhor entendimento do impacto de seus respectivos parâmetros sobre a dinâmica dos sistemas acoplados, também evidenciaram a necessidade de aprimoramentos na filtragem do sinal aplicado, a fim de otimizar o desempenho de ambas as configurações de ressonadores.

Palavras chave: Controle de vibrações, Circuitos shunt, estruturas, Resposta em frequência.

Abstract. The present work aims to experimentally investigate the interaction between nonlinear shunt circuits and coupled piezoelectric structures, with a focus on vibration control in mechatronic systems. For this purpose, an experimental setup was developed consisting of a beam-type structure with a free-fixed boundary condition, harmonically excited and instrumented with a piezoelectric element, to which shunt circuits previously reported in the literature were coupled. The frequency responses of the circuits were analyzed in the configurations of Duffing-type resonators and nonlinear energy sinks (NES), introducing different levels of nonlinearity into the system. The experimental results showed significant changes in the resonant behavior of the structure, including the attenuation of the system's oscillation amplitudes and the induction of hardening effects and hysteresis in its frequency response. Although the obtained results confirm the efficiency of the studied shunt circuits and contribute to a better understanding of the impact of their respective parameters on the dynamics of the coupled systems, they also highlighted the need for improvements in the signal filtering applied, in order to optimize the performance of both resonator configurations.

Keywords: Vibration control, Shunt circuits, structures, Frequency response.

1. INTRODUÇÃO

A atenuação de vibrações estruturais indesejadas é de enorme interesse para as mais diversas áreas da engenharia devido ao seu impacto sobre a dinâmica de estruturas em diferentes contextos, mostrando-se crucial em aplicações que abrangem desde equipamentos industriais até componentes de veículos aeroespaciais. Neste contexto, tem sido amplamente explorada na área de vibrações mecânicas uma abordagem eletrônica para o amortecimento de estruturas, por meio da aplicação de circuitos shunt ressonantes de natureza linear e não linear. Este amortecimento é realizado através do acoplamento dos circuitos shunt aos terminais de um elemento piezolétrico presente na estrutura principal, que é excitada harmonicamente.

Conforme abordado por Neubauer *et al.* (2006), além de seu grande impacto sobre o comportamento dinâmico de caráter estacionário de estruturas acopladas, circuitos shunt não lineares apresentam um grande número de parâmetros ajustáveis, que podem individualmente alterar de maneira significativa sua resposta em frequência e consequente interação com os demais componentes avaliados. O maior entendimento sobre circuitos desta natureza e consequente otimização de seus parâmetros possui o potencial de gerar sistemas mais eficazes para o controle de vibrações em diferentes aplicações dentro da engenharia.

Duas modalidades de circuitos shunt não lineares têm se destacado dentro do meio acadêmico, sendo estas as configurações de ressonadores dos tipos Duffing e nonlinear energy sink (NES). Conforme apresentado por Mosquera-Sánchez *et al.* (2024), esses tipos de ressonadores são capazes de induzir diferentes efeitos nos sistemas eletromecânicos acoplados,

como, por exemplo, a atenuação da amplitude de oscilação das estruturas implementadas, a introdução de *hardening* sobre sua resposta em frequência e a alteração de sua frequência de ressonância. Além disso, essas configurações de circuitos *shunt* preservam o alto grau de customização de parâmetros eletrônicos apresentados em outros trabalhos da literatura.

Este trabalho visa avaliar experimentalmente a resposta em frequência das duas configurações de circuitos *shunt* ressonantes não lineares previamente reportadas na literatura, propondo possíveis melhorias para tornar seu desempenho mais eficiente no contexto de controle de vibrações mecânicas. Os experimentos descritos visam avaliar também a influência da modificação de parâmetros eletrônicos dos circuitos *shunt* estudados sobre a não linearidade do sistema e a consequente alteração de seu comportamento dinâmico de caráter estacionário considerando suas diferentes configurações.

2. METODOLOGIA

2.1 Implementação dos circuitos *shunt*

Inicialmente, foi necessário realizar a montagem dos circuitos *shunt* para a realização dos experimentos, tomando como base configurações previamente reportadas na literatura. Com o objetivo de proporcionar maior flexibilidade para a implementação de quaisquer alterações pertinentes nas configurações dos ressonadores durante a realização dos testes em bancada, foi definida a utilização de um *protoboard* como base para os circuitos *shunt* durante todos os experimentos apresentados neste trabalho.

Tanto na configuração de ressonador *Duffing* quanto na configuração de *nonlinear energy sink*, os circuitos podem ser divididos em duas seções, sendo estas o segmento de capacitância negativa e o segmento de coeficiente cúbico. Em ambas as configurações de circuito *shunt*, o segmento de capacitância negativa é responsável pela parcela linear da resposta em frequência da estrutura, enquanto o segmento de coeficiente cúbico introduz não linearidade ao sistema através da implementação em cascata de dois multiplicadores analógicos AD633.

2.1.1 Ressonador *Duffing*

Com todos os materiais necessários para a montagem dos circuitos já definidos, foi dado início à implementação dos ressonadores em *protoboard* para posterior validação experimental. Primeiramente, foi realizada a montagem em bancada do circuito *shunt* na configuração de ressonador *Duffing*. Para auxiliar na montagem desta configuração de circuito *shunt*, foi utilizado como base o diagrama elétrico simplificado apresentado no trabalho de Mosquera-Sánchez and De Marqui (2024). Este mesmo diagrama elétrico é disposto na Fig. (1).

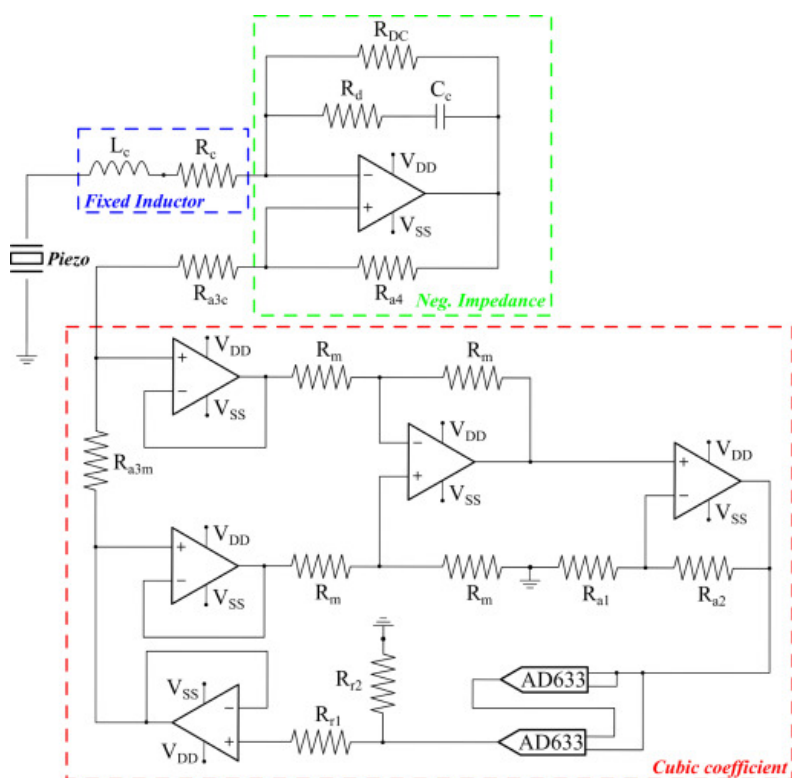


Figura 1. Diagrama elétrico do circuito na configuração de ressonador *Duffing* (Mosquera-Sánchez and De Marqui, 2024)

Para assegurar que a configuração de ressonador *duffing* do circuito *shunt* pudesse funcionar de maneira adequada, foi

necessário selecionar valores de L_c e de R_{a4} capazes de manter o sistema dentro da zona de estabilidade. Desta forma, foi implementado um indutor com valor nominal de 25 H em série com a entrada do circuito *shunt*, e o valor de R_{a4} foi definido em 510 Ω . A alimentação dos amplificadores operacionais e dos multiplicadores analógicos do sistema foi realizada de forma simétrica com o auxílio de uma fonte de bancada, regulada para o fornecimento de 15 V de tensão contínua.

Conforme apresentado por Mosquera-Sánchez and De Marqui (2024), ao acoplar esta configuração de circuito *shunt* à célula piezelétrica da estrutura, o comportamento dinâmico do sistema se altera, de modo que o valor do coeficiente cúbico α do mesmo passa a ser regido pela Eq. (1). Desta maneira, o nível de não linearidade presente na resposta em frequência da estrutura pode ser facilmente alterado variando-se o valor do resistor R_{a2} , presente no segmento de coeficiente cúbico do circuito. Com o intuito de possibilitar que os testes em bancada pudessem ser realizados de maneira mais ágil e eficiente, foi implementado um *trimpot* com valor nominal de 50 K Ω no lugar do resistor R_{a2} durante a realização dos experimentos.

$$\alpha = \frac{1}{100} \left(1 + \frac{R_{a2}}{R_{a1}} \right)^3 \left(\frac{R_{r2}}{R_{r1} + R_{r2}} \right) \left(\frac{R_{a3m}^3}{(R_{s4} C_c)^3} \right) \quad (1)$$

2.1.2 Nonlinear energy sink (NES)

Após a implementação e realização de todos os experimentos referentes à configuração de ressonador *Duffing* do circuito, foram conduzidos também testes considerando o acoplamento de um NES ao sistema da estrutura. A transição entre as configurações de ressonador *Duffing* para NES foi realizada através de pequenas modificações no circuito implementado em *proto-board*, de modo a alterar o comportamento dinâmico do sistema quando excitado harmonicamente. Um diagrama elétrico simplificado da configuração de *nonlinear energy sink* utilizada durante a realização dos experimentos é apresentado na Fig. (2)

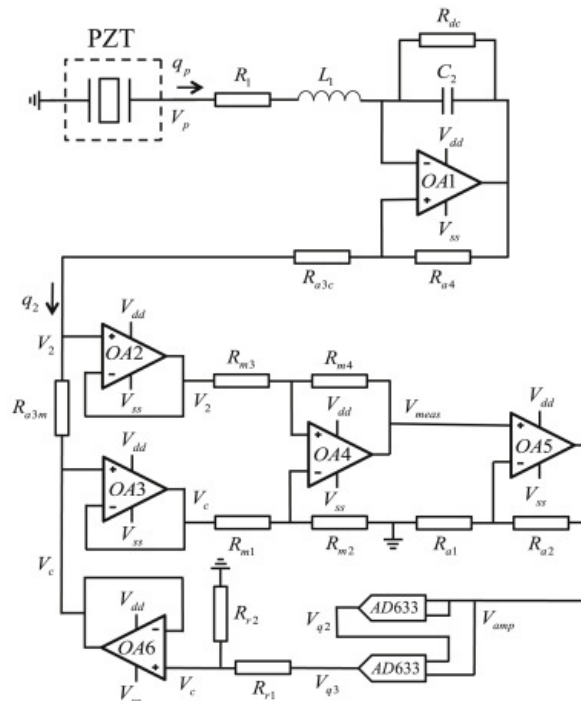


Figura 2. Diagrama elétrico do circuito na configuração de NES (Silva *et al.*, 2018)

Assim como no caso do ressonador *Duffing*, ajustes iniciais foram necessários para assegurar que o circuito *shunt* pudesse operar de maneira estável durante a realização dos experimentos propostos. Mais uma vez, foi necessária a seleção de um indutor com propriedades adequadas para o bom funcionamento do sistema, bem como a definição de um novo valor de R_{a4} . Foi implementado no circuito um indutor com valor nominal de 1 H, e o valor de R_{a4} foi configurado em 330 Ω . A alimentação dos componentes do sistema foi realizada utilizando a mesma fonte de bancada e parâmetros implementados nos experimentos anteriores.

2.2 Equipamentos utilizados

Para a realização dos experimentos propostos neste trabalho, foi adotada como objeto de teste uma estrutura do tipo viga, obedecendo a condições de contorno do tipo livre-engastada, harmonicamente excitada e com uma camada piezelétrica unitária acoplada a suas faces. Para que fosse possível realizar a excitação da viga, foi implementado na bancada de testes um *shaker* eletrodinâmico modelo K2007E01 da fabricante *The Modal Shop*, sobre o qual foi posicionado o engaste da estrutura. A Figura (3) apresenta a configuração experimental da estrutura. Foi necessária também a adoção de um amplificador externo conectado em série com o *shaker* para assegurar que o mesmo pudesse excitar a viga de maneira efetiva.

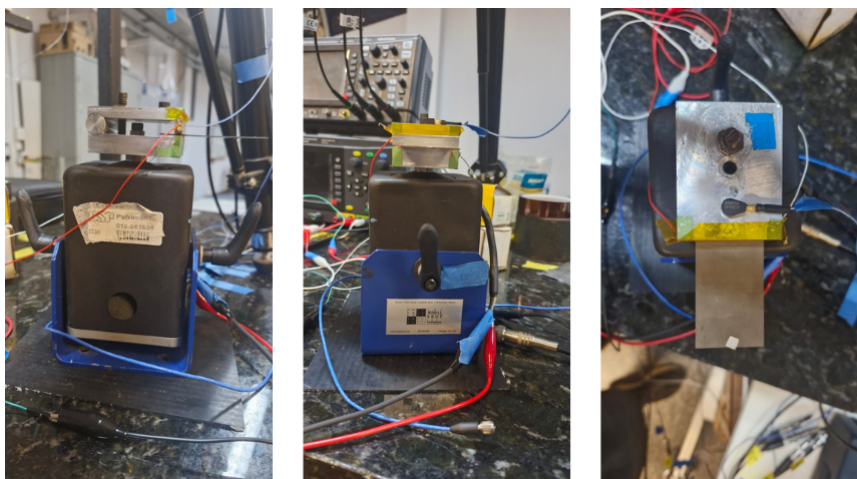


Figura 3. Conjunto estrutura-engaste e *shaker* utilizados nos experimentos: (a) Vista lateral; (b) Vista frontal; (c) Vista superior

Foram implementados também na bancada de testes um acelerômetro uniaxial posicionado sobre o engaste da estrutura e um laser modelo PDV 100 da empresa *Polytec*, posicionado acima da mesma e apontado para a extremidade livre da viga, onde foi colada uma pequena fita reflexiva. A utilização conjunta destes sensores permite que sejam mensurados durante a realização dos experimentos a aceleração vertical do sistema, bem como o deslocamento da extremidade livre da viga em estado de excitação, respectivamente. A devida inspeção destes dados possibilita que os efeitos dos circuitos *shunt* sobre a dinâmica do sistema possam ser avaliados de forma eficiente.

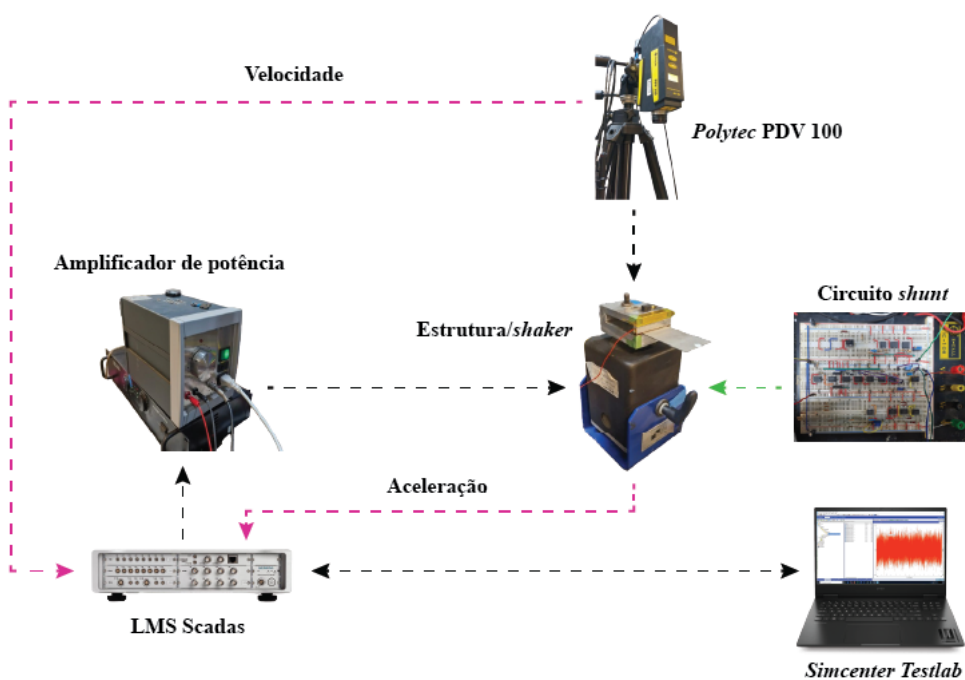


Figura 4. Diagrama de blocos simplificado do sistema utilizado nos experimentos

O sensoriamento dos parâmetros necessários para a avaliação da resposta em frequência das configurações de ressonadores apresentadas durante os experimentos foi realizado com auxílio de um sistema LMS SCADAS, utilizado em conjunto com o *software Simcenter Testlab*, ambos desenvolvidos pela empresa *Siemens*. A Figura (4) apresenta um diagrama de blocos simplificado com os equipamentos implementados ao longo do desenvolvimento dos experimentos descritos neste trabalho, exemplificando a configuração da bancada de testes utilizada e sintetizando as interações entre cada um destes componentes em relação aos demais. Ademais, também foi evidenciado no diagrama o fluxo de informações do sistema.

2.3 Coleta de dados

A obtenção de dados experimentais para ambas as configurações de circuitos *shunt* foi realizada tomando como base variações regulares de $10\text{ K}\Omega$ no valor do trimpot implementado em R_{a2} , no segmento de coeficiente cúbico dos ressonadores avaliados experimentalmente. Além disso, a resposta em frequência do sistema foi avaliada também considerando circuito aberto (OC), curto-circuito (SC) e circuitos puramente lineares, obtidos através da remoção do segmento não linear de ambos os ressonadores. As varreduras foram realizadas em um *range* de 50 a 250 Hz, considerando 65536 pontos por passagem. Levando em conta a possibilidade de histerese no comportamento dinâmico da estrutura, a coleta dos dados referentes a cada configuração dos ressonadores foi realizada tanto em *up sweep* quanto em *down sweep*, adotando escala logarítmica.

O pós-processamento dos dados coletados experimentalmente foi realizado com auxílio de um algoritmo disponibilizado para o *software MATLAB*. Todos os dados coletados durante a realização dos testes em bancada foram divididos de acordo com a configuração de ressonador implementada, e posteriormente sobrepostos em gráficos. Esta abordagem possibilita que os efeitos da variação do nível de não linearidade do circuito possam ser visualizados de maneira mais intuitiva, e que fenômenos atípicos como, por exemplo, a possível histerese do comportamento dinâmico do sistema possam ser detectados mais facilmente para posterior discussão.

3. RESULTADOS

3.1 Resposta em frequência para o ressonador *Duffing*

Após a devida implementação de todos os equipamentos necessários para a realização dos testes em bancada, foi dado início aos experimentos utilizando o circuito *shunt* na configuração de ressonador *Duffing*. Foram coletados dados referentes ao comportamento dinâmico da estrutura nessas condições e, após a realização de pós-processamento dos mesmos em *MATLAB*, foi possível compilar os resultados obtidos em um gráfico. A Figura (5) apresenta a resposta em frequência da estrutura para diferentes níveis de não linearidade. Para tornar a visualização mais clara, as condições de cada teste, bem como as cores das curvas referentes aos mesmos foram evidenciados ao lado do gráfico gerado.

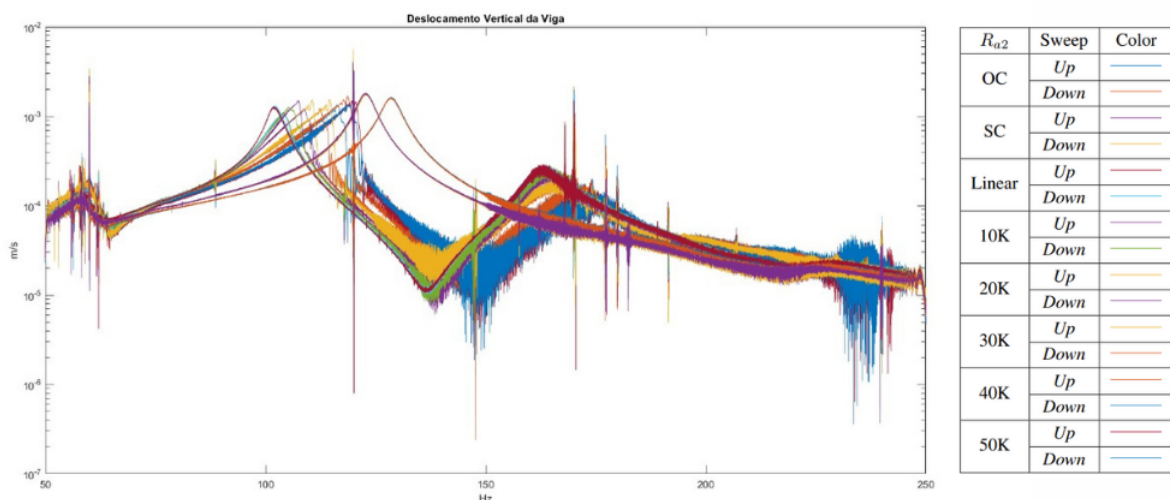


Figura 5. Deslocamento da viga na configuração de ressonador *Duffing*

3.2 Resposta em frequência para o NES

De maneira análoga aos procedimentos realizados com os dados coletados durante os experimentos com o circuito *shunt* na configuração de ressonador *Duffing*, os resultados obtidos durante os testes com NES foram processados digitalmente e compilados em um gráfico. A Figura (6) apresenta o comportamento dinâmico da estrutura para diferentes níveis de não linearidade. Mais uma vez, assim como realizado com a configuração de ressonador *Duffing*, as cores referentes a cada uma das curvas de resposta em frequência do sistema, bem como seus respectivos valores de R_{a2} , foram evidenciadas ao lado do gráfico gerado em *MATLAB* para tornar mais simples a visualização dos resultados obtidos experimentalmente com o circuito NES.

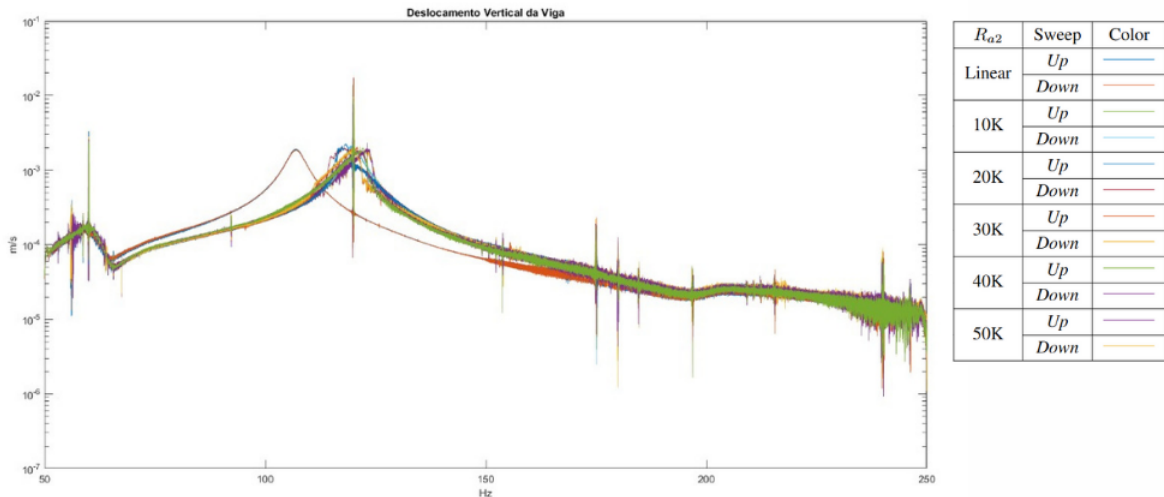


Figura 6. Deslocamento da viga na configuração de *nonlinear energy sink*

3.3 Discussão

3.3.1 Desempenho dos circuitos

Conforme é possível constatar com base nos resultados apresentados neste trabalho, ambas as configurações do circuito *shunt* (ressonador *Duffing* e *nonlinear energy sink*) apresentaram grande influência sobre o comportamento dinâmico de caráter estacionário da estrutura, especialmente no que tange à frequência de ressonância da mesma. Apesar de ambas as configurações do circuito *shunt* terem induzido o efeito de *hardening* sobre o sistema, o comportamento da estrutura mostrou-se extremamente distinto entre os dois casos avaliados experimentalmente.

Durante os experimentos com o circuito *shunt* na configuração de ressonador *Duffing*, mostrou-se notável o surgimento de duas ressonâncias distintas no comportamento dinâmico da estrutura. Este efeito ocorre pois, diferente da configuração NES, o circuito do ressonador *Duffing* introduz uma parcela linear mais significativa na resposta em frequência do sistema. Com a implementação da configuração NES, a parcela linear do circuito *shunt* passa a ser quase nula, fazendo com que a ressonância do circuito tenda para frequências mais baixas e, finalmente, resultando no surgimento de uma única ressonância na largura de banda avaliada (50 Hz a 250 Hz).

Foi evidenciada nos dados coletados a influência da sintonização do valor de R_{a2} em ambas as configurações de circuitos *shunt*. No caso do ressonador *Duffing*, valores maiores de não linearidade resultaram em atenuação mais eficiente da segunda ressonância do sistema. Na configuração NES, o efeito de *hardening* atuando sobre a ressonância do sistema mostrou-se mais evidente, especialmente ao configurar valores mais elevados de R_{a2} . De maneira geral, a resposta em frequência de ambas as configurações de circuitos *shunt* foi condizente com o esperado, mostrando-se similar a resultados apresentados previamente na literatura.

É possível se observar também nos dados coletados experimentalmente a existência de histerese no comportamento de ambas as configurações do circuito *shunt*, a depender do sentido de excitação (*up sweep* ou *down sweep*) do sistema. Este comportamento torna-se mais aparente próximo às frequências de ressonância dos sistemas, onde o efeito de *hardening* induzido ocorre de maneira mais intensa. A histerese relatada, apesar de não possuir grande interferência sobre o módulo de deslocamento da viga na frequência de ressonância, descaracteriza a curva desta em coletas de dados com passagens rápidas, inviabilizando as mesmas.

3.3.2 Qualidade do sinal estudado

Avaliando os resultados obtidos experimentalmente, torna-se de suma importância salientar a grande quantidade de ruído presente nos dados coletados, especialmente quando a estrutura é submetida a amplitudes de oscilação baixas. Este comportamento demonstrou-se particularmente problemático durante a utilização do circuito na configuração de ressonador *Duffing*, com o qual a curva de resposta em frequência do sistema na região entre ressonâncias foi fortemente descaracterizada. O surgimento deste fenômeno muito provavelmente se deve à implementação dos multiplicadores analógicos AD633 nos circuitos *shunt*, uma vez que, em condições de operação normais, este componente reduz a amplitude do sinal de entrada em 10 vezes, prejudicando consideravelmente a relação sinal-ruído do sistema.

Além disso, ao longo de todos os experimentos, tornou-se notável a existência de surtos em frequências específicas de varredura. Parte considerável dessas anomalias pode ser atribuída à interferência da rede elétrica do laboratório utilizado durante o desenvolvimento dos experimentos descritos, uma vez que se caracterizam como harmônicos da mesma. Dito isso, parte dos surtos ainda não possui origem conhecida, tornando necessária uma investigação mais crítica durante a realização de futuros testes. Cabe ressaltar que, apesar de visíveis nos resultados apresentados neste trabalho, essas anomalias não possuem nenhum impacto real sobre o desempenho dinâmico dos sistemas avaliados.

3.3.3 Propostas de melhoria para o sistema

Levando em conta a grande quantidade de ruído gerado nas diferentes configurações do circuito *shunt*, mostra-se necessária a implementação de uma filtragem mais eficiente do sinal do sistema. Para isso, é necessário avaliar primeiramente o impacto da implementação de um filtro em diferentes partes dos circuitos, visando obter maior eficiência no que tange à relação entre sinal e ruído dos sistemas. A partir daí, é necessário avaliar também diferentes categorias de filtro compatíveis com o sistema, visando não apenas melhorar a qualidade do sinal obtido, mas também evitar qualquer impacto indesejado sobre o desempenho do circuito *shunt*.

Ademais, é importante avaliar também a minimização de prejuízos provenientes de diferentes fatores externos ao sistema da estrutura, e que podem interferir de forma significativa em seu comportamento dinâmico no contexto dos experimentos realizados. Além de harmônicos gerados sobre o sinal de saída pela influência da rede elétrica do laboratório onde foram conduzidos os testes em bancada, a oxidação de trilhas na *protoboard* bem como o desgaste de componentes utilizados no circuito *shunt* podem prejudicar o desempenho do sistema como um todo. Com isso em mente, a adoção de placas de circuito impresso deveria ser avaliada, uma vez que poderia reduzir consideravelmente a incidência e o impacto de parte dos problemas listados anteriormente em detrimento de uma menor flexibilidade em relação à montagem do circuito.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo analisou de maneira experimental o desempenho de circuitos *shunt* não lineares aplicados ao controle de vibrações induzidas em estruturas piezoelétricas. Foram avaliadas as respostas em frequência do sistema utilizando ressonadores do tipo *Duffing* e *nonlinear energy sink* (NES), considerando também a influência da modificação de parâmetros específicos dos circuitos eletrônicos apresentados. Os resultados obtidos ao longo dos experimentos realizados comprovaram a capacidade dos ressonadores estudados para modificar o comportamento dinâmico de caráter estacionário da estrutura utilizada, impactando de maneira significativa a resposta em frequência do sistema. Foi evidenciada com o auxílio de dados experimentais a introdução de efeitos de *hardening* e a alteração da frequência e amplitude de ressonância da estrutura com o acoplamento dos circuitos *shunt*, bem como a influência da variação de seu nível de não linearidade, realizada através de modificações de seus parâmetros eletrônicos. Constatou-se também a existência de histerese na resposta em frequência do sistema com o acoplamento de ambos os ressonadores, considerando as diferentes configurações de circuitos eletrônicos testadas experimentalmente. De modo geral, os resultados alcançados ao longo deste trabalho contribuem para um maior entendimento sobre o comportamento de circuitos *shunt* não lineares, oferecendo também propostas de possíveis melhorias para assegurar uma maior qualidade nos dados experimentais obtidos em testes futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Este projeto tem sido parcialmente financiado pela Pró-reitoria de Pesquisa e Inovação da Universidade de São Paulo, por meio do "Programa de Apoio a Novos Docentes", bem como pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por meio dos projetos 2018/14564-9 e 2020/01608-6.

As atividades aqui descritas foram realizadas como parte do projeto de iniciação científica de número 2024-6263 oferecido pela Universidade de São Paulo, e seu autor foi financiado pelo Programa Unificado de Bolsas da instituição. Gostaria de agradecer também ao professor Leopoldo Pisanelli Rodrigues de Oliveira pelo fornecimento dos equipamentos utilizados ao longo dos experimentos aqui descritos.

6. REFERÊNCIAS

- Mosquera-Sánchez, J., Alfahmi, O., Erturk, A. and De Marqui, C., 2024. “Broadening the frequency response of a duffing-type piezoelectric shunt by means of negative capacitance”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 578, p. 118344. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118344>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X2400107X>.
- Mosquera-Sánchez, J. and De Marqui, C., 2024. “Broadband and multimode attenuation in duffing- and nes-type piezoelectric metastructures”. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 270, p. 109084. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109084>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740324001279>.
- Neubauer, M., Oleskiewicz, R., Popp, K. and Krzyzynski, T., 2006. “Optimization of damping and absorbing performance of shunted piezo elements utilizing negative capacitance”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 298, No. 1, pp. 84–107. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.04.043>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X06004159>.
- Silva, T.M., Clementino, M.A., De Marqui, C. and Erturk, A., 2018. “An experimentally validated piezoelectric nonlinear energy sink for wideband vibration attenuation”. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 437, pp. 68–78. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.08.038>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X18305455>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.