

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO COM AMORTECEDOR ATIVO CONTROLADO POR ATUADOR PIEZELÉTRICO

Thiago Vianna Galavotti¹, tygalavotti@gmail.com
Vitor Ramos Franco¹, vrfranco86@yahoo.com.br
Aldemir Aparecido Cavalini Junior¹, aacjunior@aluno.feis.unesp.br
Gilberto Pechoto de Melo¹, gilberto@dem.feis.unesp.br

¹ GMSINT – Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes, Department of Mechanical Engineering, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Av. Brasil 56, Ilha Solteira, SP, Brazil, ZIP CODE 15385000, www.dem.feis.unesp.br/gmsint

Resumo: Este artigo apresenta uma técnica experimental para redução nos níveis de vibração usando amortecedor ativo controlado por atuador piezoelétrico. A técnica de controle semi-ativo foi aplicada a um protótipo com amortecimento de atrito gerado pelo atuador piezoelétrico em contato com a estrutura controlada. Assim, a dilatação dos atuadores piezoelétricos foram utilizados para a variação do coeficiente de amortecimento através da variação da força normal gerada entre o atuador ea estrutura. Em sistemas de controle semi-ativo sua principal característica é a falta de forças aplicadas na estrutura, ou seja, o sistema de controle só tem a capacidade de dissipar a energia gerada pelas vibrações. Esta característica diferencia os sistemas de controle ativo em que a redução da vibração é geralmente fornecida por uma força contra o movimento. Assim, o sucesso da implementação do sistema de controle ativo depende das limitações de atuadores eletromecânicos e da disponibilidade de energia a partir do sistema de controle, que ocorre em menor escala no sistema de controle semi-ativo. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo o uso de atuadores piezoelétricos para alterar as características de estrutura física (amortecimento), resultando em uma melhor utilização da energia fornecida ao atuador. Com os resultados obtidos, foi possível controlar o amortecimento estrutural do protótipo, reduzindo os seus níveis de vibração.

Palavras-chave: controle semi-ativo, amortecedor por atrito, materiais piezoelétricos

1. INTRODUÇÃO

Partindo da idéia de construir um amortecedor ativo, projetou-se um sistema composto por uma massa sustentada por molas no qual o atuador piezoelétrico em contato com a massa é capaz de modificar o amortecimento do protótipo através do atrito gerado entre atuador piezoelétrico e a massa suspensa. Dessa forma, o protótipo é composto por duas massas suspensas por molas, sendo que as massas permanecem em contato, a fim de gerar amortecimento por atrito. Como já explicado, o atrito gerado pelo contato das massas deveria ser variável, dessa forma utilizou-se como sendo a menor das massas, um atuador piezoelétrico modelo APA 60SM pertencente ao Grupo de Pesquisas Sobre Materiais e Sistemas Inteligentes GMSINT (UNESP – Ilha Solteira).

Devido ao pequeno deslocamento gerado pelo PZT, aproximadamente 80 micrômetros e conseqüentemente ao pequeno atrito gerado por esse deslocamento, para a confecção do protótipo, foi utilizado acrílico como material da estrutura devido a sua menor densidade em comparação com outros metais disponíveis em laboratório. Assim, com um protótipo mais leve, foi possível aproveitar de maneira satisfatória a força normal gerada pelo deslocamento do PZT. A escolha do acrílico facilitou também a confecção da estrutura, por ser de fácil usinagem. As molas foram adquiridas comercialmente e testes determinaram a rigidez de cada mola separadamente já o atuador piezoelétrico tem suas dimensões e características tabeladas pelo fabricante.

Para que o contato inicial entre o PZT e a massa suspensa fosse regulável, a massa suspensa era composta por duas partes que se ligavam com o auxílio de parafusos, dessa forma o atrito inicial, ou seja, antes que o PZT dilatasse ou contraísse, podia ser escolhido através do ajuste dos parafusos. Entre essas duas peças foi colocado o PZT que era guiado por um trilho. O atuador piezoelétrico disponível era envolto por uma estrutura, sendo que o deslocamento do PZT e o deslocamento das faces de contato da estrutura do atuador apresentavam sentido opostos. Para uma melhor compreensão é possível observar na Figura 1, os sentidos do deslocamento do PZT e da estrutura do atuador

representados pelas setas vermelhas e amarelas respectivamente, bem como a distância “d” regulável por parafusos, que o protótipo apresentava.

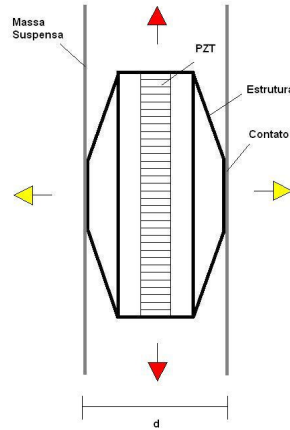


Figura 1: Esquema do atuador piezelétrico em contato com a massa suspensa

Como a excitação não seria aplicada diretamente na massa suspensa e sim na extremidade da mola, um suporte precisou ser construído para sustentar a mola, nesse suporte foi fixada uma guia, para que a mola apresentasse uma direção preferencial de deslocamento. Dessa forma o protótipo se aproximaria de um sistema massa mola.

Solucionado as questões sobre o contato entre o atuador e a massa suspensa, e de posse das dimensões das molas e do PZT foi possível projetar em software de desenho AutoCAD®, um esboço para o protótipo, e assim obter as dimensões para a futura usinagem das peças de acrílico. A Figura 2 apresenta o esboço para o protótipo.

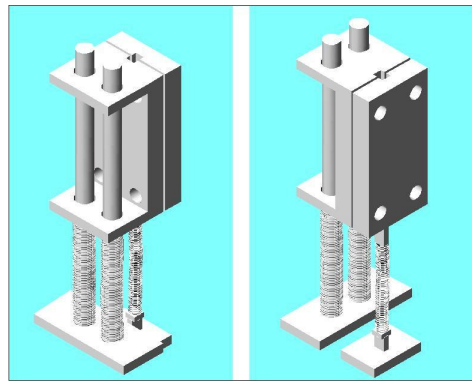


Figura 2: Esboço do protótipo

A força de excitação do sistema foi aplicada no suporte que contém as duas molas e suas respectivas guias, já o outro suporte, o que contém a mola sustentadora do PZT, é mantido fixo.

2. MODELAGEM DO PROTÓTIPO

O conceito do sistema pode ser visto na Figura 3, onde “M2” representa a massa do material piezelétrico, “N” representa força normal entre o PZT e a massa suspensa e μ o coeficiente de atrito entre essas partes.

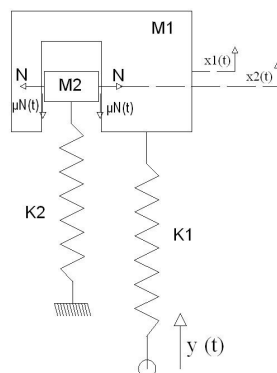


Figura 3: Modelagem do protótipo para segunda simulação

Observando a Figura 3, nota-se que quanto maior for o deslocamento do PZT, maior será seu contato com a massa suspensa “M1”, dessa forma ocorre o aumento do atrito entre o PZT e a massa suspensa e assim o aumento do amortecimento do sistema. A variação do deslocamento do PZT pode ser controlada externamente a fim de obter um maior ou menor amortecimento para o sistema. A excitação do sistema é originada por uma função aplicada diretamente na extremidade da mola com rigidez “K1”, tendo como resposta os deslocamentos da massa suspensa “M1” e da massa do PZT representada por “M2”. Através da velocidade relativa entre o deslocamento das duas massas é possível obter o sentido da força de atrito gerada pelo contato das massas.

Para um teste inicial foi elaborado um diagrama de blocos em ambiente Matlab Simulink®, aplicado ao modelo da figura 3, onde foi observado o comportamento da massa suspensa para diferentes valores da força normal, a qual varia com a tensão aplicada ao PZT. Esse teste visou obter um diagrama de blocos em Matlab Simulink®, para que posteriormente fosse possível aplicar ao sistema um tipo adequado de controle. Neste caso o tipo de controle é semi-ativo, uma vez que só é possível alterar parâmetros que dissipam energia do sistema, neste caso o amortecimento. Ao montar as equações de movimento para o sistema da figura 3, obtemos as seguintes equações diferenciais ordinárias de segunda ordem:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_1 Y(t) + \mu N(t) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + \mu N(t) - k_2 x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Como o método de integração utilizado opera com equações diferenciais de primeira ordem, para que essas equações sejam integradas é necessário transformá-las em equações de primeira ordem. Para isso os seguintes procedimentos são adotados:

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 \\ y_2 &= \dot{x}_1 \\ y_3 &= x_2 \\ y_4 &= \dot{x}_2 \end{aligned}$$

Dessa forma a equação do movimento se torna:

$$\{\dot{y}\} = [A] \{y\} + [E] \{Y(t)\} + [B] \{\mu N\} \quad (2)$$

E assim as matrizes de estado podem ser montadas através dos parâmetros construtivos:

$$\{\dot{y}\} = \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} \quad \{y\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ x_2 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \quad [A] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1/m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -k_2/m_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 \\ k_1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ -1/m_2 \end{bmatrix}$$

Como a equação diferencial ordinária foi reduzida à primeira ordem pode-se resolver a equação do movimento, computacionalmente, de diversas maneiras, onde as variáveis a serem encontradas são as respostas do sistema, no caso “x1” e “x2”. Porém para sua resolução, nesse caso, é necessário conhecer a entrada “y(t)”, que deve ser fornecida de acordo com as informações que se deseja obter sobre o sistema. Para a resolução da equação foi utilizado o ambiente Matlab Simulink®, no qual foram montadas as matrizes e os vetores de acordo com a equação (2). Para integrar a solução da equação foi escolhido o método de Runge Kutta de quarta ordem disponível no Simulink®.

Como nessa etapa do trabalho o propósito era apenas a validação da resolução das equações utilizando Simulink®, utilizaram-se os valores de massa, rigidez, coeficiente de atrito, etc. medidos experimentalmente.

Fazendo $y(t)$ igual uma entrada degrau, e variando valores da força normal obtemos as seguintes respostas para o deslocamento da massa suspensa “M1”:

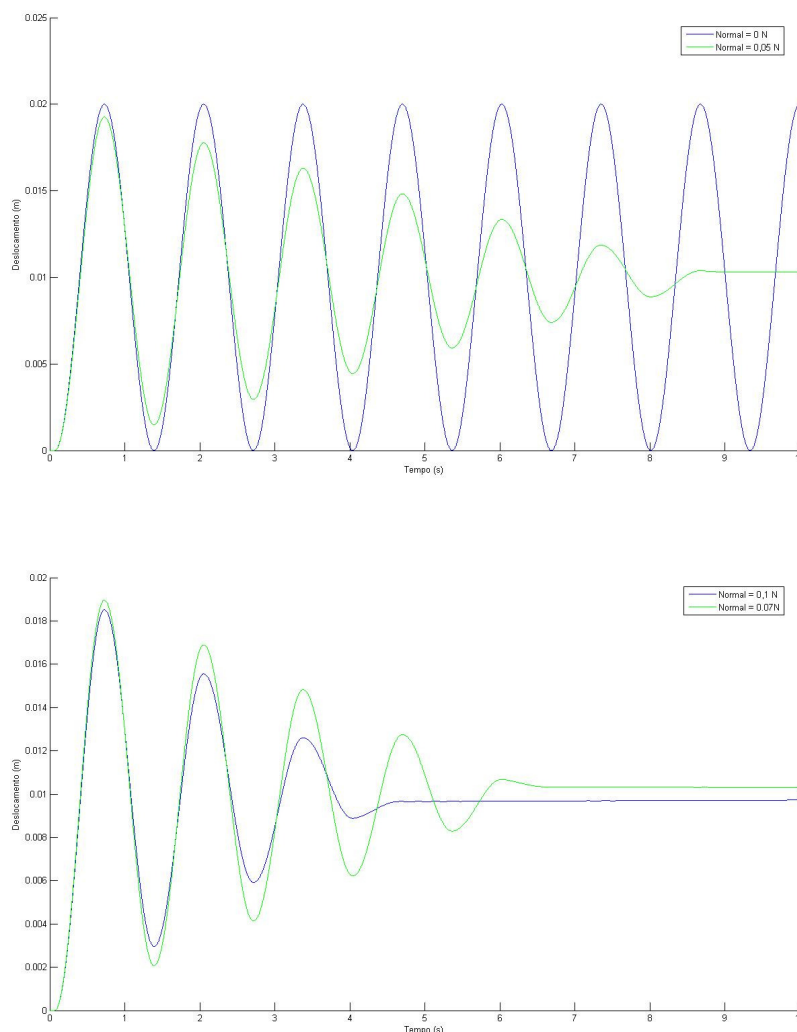


Figura 4: Deslocamento da Massa “M1” para entrada degrau.

Através da análise dos gráficos acima é possível observar o amortecimento do sistema, que aumenta juntamente com a força de atrito entre as massas “M1” e “M2”.

No gráfico dessa Figura, nota-se no primeiro que para uma força normal de zero Newtons não há qualquer tipo de amortecimento, sendo que as demais curvas sofrem interferência apenas do amortecimento proveniente do atrito das massas.

Dessa forma o controle é aplicado ao amortecimento do sistema, que dependendo das leis de controle, deve adicionar um maior ou menor amortecimento ao sistema. Nesse trabalho foi utilizado o controle *on/off*, que consiste em escolher o coeficiente máximo ou mínimo de amortecimento dependendo da situação em que o sistema se encontra.

2.1. Simulação do Protótipo Controlado

O objetivo dessa seção é validar uma técnica de controle para sua aplicação no protótipo construído. Nesse caso o controle será aplicado com a intenção de retirar energia de vibração da massa M1 apresentada no modelo da figura 3. Validado a simulação para o modelo, finalmente pode-se aplicar a lei de controle ao protótipo, lembrando que é esperado que o protótipo controlado tenha atenuação nos níveis de vibração quando excitados próximo de suas frequências naturais.

Para testes com o controle *On-Off*, primeiramente foi realizado estudos numéricos antes mesmo da construção do protótipo, para evitar desperdício de material e trabalho, esse é o principal objetivo da modelagem durante a preparação do presente trabalho.

Para isso, foi construído em software Simulink®, um algoritmo para comparar o deslocamento da massa “M1” do protótipo, com e sem controle. O diagrama de blocos é composto de dois casos, um deles quando se aplica o amortecimento constante proveniente do atrito do PZT e o outro quando se aplica o amortecimento variável, que varia de acordo com força normal aplicada ao PZT proveniente das leis de controle citadas abaixo. Se a massa M1 do protótipo for controlada então podemos acoplar esse sistema a uma estrutura que sofra excitações desconhecidas, no sentido de atenuar suas amplitudes, dessa forma teríamos uma estrutura controlada. Assim fica evidente que a principal meta da simulação a seguir é controlar a massa M1 do protótipo, já que a única diferença entre controlar M1 ou controlar uma estrutura acoplada está na quantidade de massa adicionada ao protótipo.

Considerando os parâmetros de controle encontrados na Figura 3, temos:

$\dot{x}_1 = \text{velocidade da massa suspensa}$

$\dot{y}(t) = \text{velocidade da excitação do sistema}$

Levando em consideração leis de controle aplicadas em suspensões automotivas utilizadas em Motta, (2005), temos o valor escolhido pelo controlador para o amortecimento do sistema:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{y}(t)) \geq 0, \quad C = C_{Máx} \\ \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{y}(t)) < 0, \quad C = C_{Min} \end{aligned} \quad (4.5)$$

O sistema foi excitado próximo da frequência natural, para que fosse possível notar a funcionalidade do sistema de controle. O diagrama de blocos construído em Simulink®, descreve que quando o controlador escolhe a posição *Off* o amortecimento do sistema passa a ser nulo, o que não ocorre em casos reais, porém esse valor foi escolhido como nulo apenas para validar a comparação no qual o sistema é amortecido, ou seja, apenas nos casos em que o controlador escolhe a posição *On*. Dessa forma toda a redução na amplitude de vibrações conseguida através do controlador, é proveniente do tipo de controle aplicado.

Após avaliar as frequências, escolheu-se excitar o sistema em 50 rad/s (próximo da primeira frequência natural) lembrando que os parâmetros do sistema, como massa, rigidez e amortecimento foram medidos experimentalmente.

A figura 5 representa a comparação entre as amplitudes de vibração do sistema controlado e não controlado, para frequência de excitação de 50Hz.

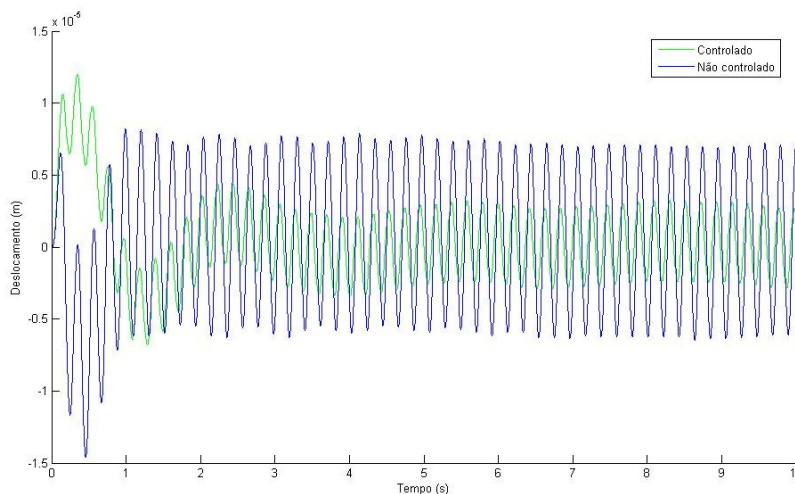


Figura 5: Amplitudes para sistema controlado e não controlado excitados a uma frequência de 40 rad/s, próxima da primeira frequência natural.

2.2. Resultados experimentais

De posse de um protótipo com amortecedor variável, como visto anteriormente é possível aplicar a esse tipo de sistema tipos de controladores que visam reduzir os níveis vibratórios do sistema. Dessa forma montou-se uma bancada com equipamentos disponíveis para transferir as idéias do controlador on/off, simulada anteriormente, para o protótipo construído. Os materiais utilizados no experimento estão representados na Figura 6 e listados a seguir:

- **Protótipo** (construído em laboratório)
- **Pzt**: Cedrat modelo: APA 60SM

- **Shaker:** Veb Robotron – Messelektronik, modelo: 1076 ELN138. 210V – 77Hz
- **Amplificador:** MIDÉ QuickPack Power Amplifier, modelo:EL1225. Volt Limit:100-200V, Current Limit: 50mA-200mA.
- **Gerador de sinal:** Politerm, modelo:PT9300
- **Placa de aquisição de sinal:** Dspace, modelo 1103
- **Computador:** Pentium IV, 2.8 GHz, 1 GB de RAM e 40 GB de Hard Disc.
- **Ganho (Condicionador de Sinais):** PCB Piezotronics, Inc Banda de frequência: 0,15 Hz a 100 KHz
- **acelerômetros:** PBC, modelo: 352C22 Piezotronics®

Para que a placa Dspace® de aquisição de sinais recebesse um sinal de maior amplitude, um ganho de dez vezes foi adicionado ao sinal proveniente dos acelerômetros. Já para a excitação do PZT foi necessário a utilização de um amplificador, uma vez que a tensão fornecida pela placa Dspace® é limitada em 10 volts e o PZT apresenta seu maior deslocamento em 100 volts. As leituras dos sinais de entrada e o cálculo do sinal de saída foram feitos em ambiente Matlab Simulink® comunicando esses dados com o software Dspace Control Desk® da placa de aquisição de sinais. O esquema da montagem do experimento é observado na figura a seguir.

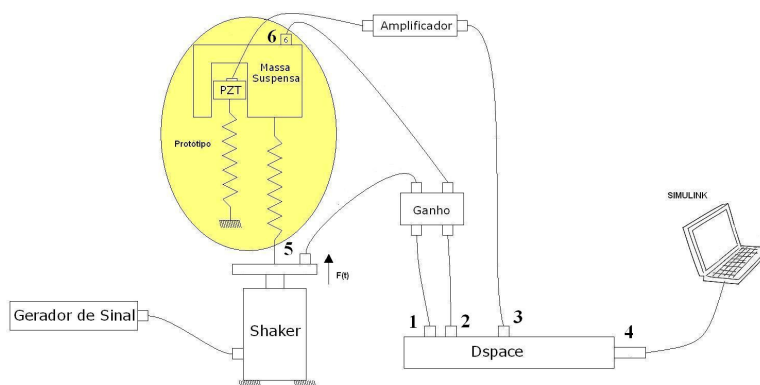


Figura 6: Esquema da montagem experimental

Na Figura 6, os números 5 e 6 correspondem aos acelerômetros utilizados para fornecer as acelerações ao sistema de controle, que por sua vez é capaz de calcular a velocidade relativa entre as partes nas quais os acelerômetros estão fixados, e assim efetuar o controle. Já a placa Dspace capta os sinais dos acelerômetros, 1 e 2, e envia sinal para o PZT, através de 3. O Simulink® juntamente com o software da placa Dspace, filtra os sinais provenientes do acelerômetro e faz a sua integração transformando-os em velocidade. Assim, envia um sinal para o PZT, para que possa ser ligado ou desligado, fazendo assim o controle on/off. O controle executado pelo Simulink® pode ser observado na Figura 8, na qual os diagramas com números em vermelho correspondem aos sinais fornecidos e recebidos pela placa de aquisição com mesmos índices da Figura 6.

Os filtros aplicados, no diagrama de Simulink® abaixo, que filtram os sinais provenientes do acelerômetro são do tipo passa baixa já que a excitação do protótipo foi mantida em torno de 8,0 Hz. Ao excitar o sistema com frequências maiores, próximos da segunda frequência natural, o comportamento da massa suspensa apresentou não linearidades, assim outros modos de vibrar surgiram e alteraram a aquisição de dados. Porém como o principal interesse do estudo é validar o controle próximo da frequência natural de maior amplitude foi possível realizar o teste com êxito.

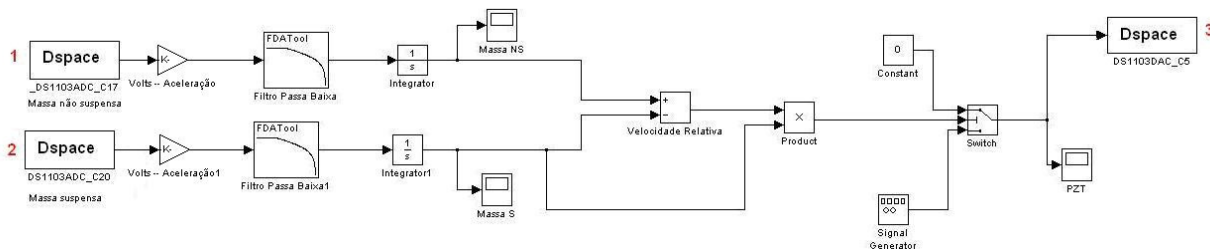


Figura 7: Diagrama utilizado para o controle do protótipo

O sinal utilizado para excitar o PZT, quando se deseja um menor amortecimento na massa suspensa, é do tipo seno quadrado de alta frequência, igual o sinal fornecido ao PZT em testes anteriores de verificação da alteração do

coeficiente de amortecimento. Esse sinal comporta-se bem para o tipo de ação que se deseja obter do PZT, uma vez que como o sinal apresenta alta frequência à excitação do PZT pode ser considerada constante, já que o mesmo se mantém polarizado durante a excitação.

Para validar o sistema de controle os gráficos do comportamento da velocidade da massa suspensa com o controle *on/off* e sem o controle, e podem ser observados na figura 8.

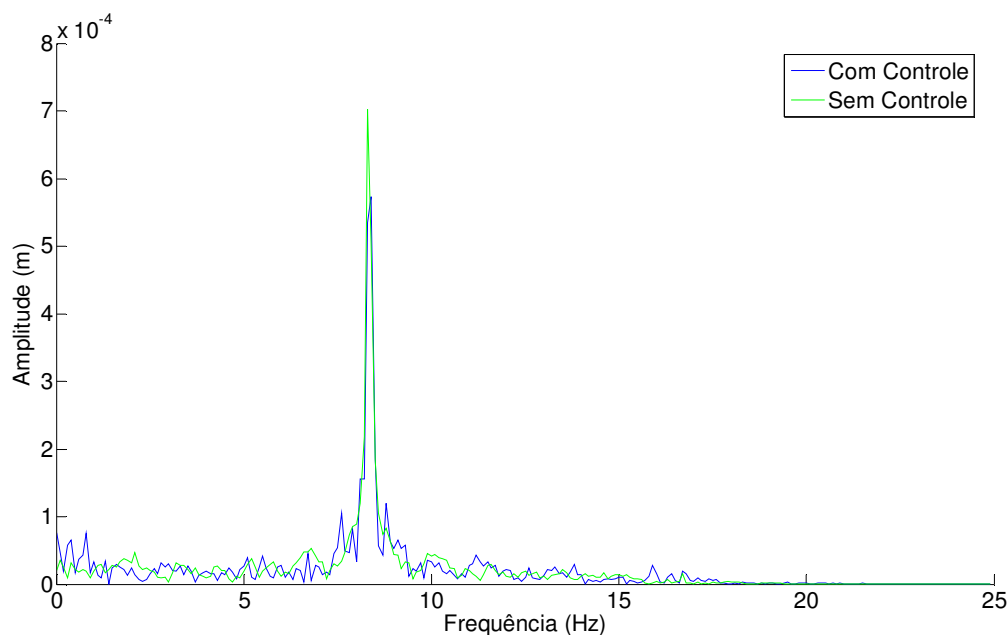


Figura 8: Resposta em frequência da massa M1 controlada e sem controle.

Ao analisar o gráfico acima nota-se que as amplitudes de vibração da massa suspensa foram reduzidas com o controle, uma vez que as curvas demonstradas no gráfico comparam as velocidades com e sem controle.

3. REFERÊNCIAS

- MOTTA, DANIEL DA SILVA,, (2005). "Modelagem de uma suspensão veicular com elementos não lineares e comparação de seu desempenho com um modelo semi-ativo" / Daniel da Silva Motta. --Campinas, SP: [s.n.].
- CHEN, Y., WICKRAMASINGHE, V., & ZIMCIK, D. (2004). "Smart Spring Impedance Control Algorithm for Helicopter Blade Harmonic Vibration Suppression." *Journal of Vibration Control* , 543-560.
- CROSBY, M. E KARNOPP, D.C., (1973), "The active damper – a new concept for shock and vibration control", *Shock Vibration Bulletin, Part H*, Washinton DC.
- CUNEFARE, K.A. (2002). "State-Switched Absorber for Vibration Control of Point-Excited Beams," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Feb–Mar 2002, 13(2):97–105.

Abstract: This paper presents an experimental technique for vibration reducing using active damper controlled by a piezoelectric actuator. A semi-active control technique was applied to the friction damping generated by the piezoelectric actuator in contact to the controlled structure. Thus, the dilation of the piezoelectric actuator was used for the damping coefficient variation through the variation of normal force generated between the actuator and structure. In semi-active control systems the main feature is the lack of forces applied in the structure, i.e. the control system only has the ability of dissipating energy generated by the vibrations. This feature differentiates the active control systems in which the vibration reduction is usually provided by a force against the movement. Thus, the successful implementation of active control system depends on the electromechanical limitations of actuators and on the energy availability from the control system, which occurs on a smaller scale in semi-active control system. In this context, this study aims at the use of piezoelectric actuator to change the physical structure characteristics (damping) resulting in a better use of energy supplied to the actuator. With the results obtained, it was possible to control the structural damping of the prototype, reducing its vibration levels.