

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM DUTOS UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO NA BAIXA FREQUÊNCIA

Fabiana Alves Pereira, fabianaapereria@yahoo.com.br¹

Geisa Arruda Zuffi, geisazuffi.gz@gmail.com¹

Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@mecanica.ufm.edu.br²

Marcus Antonio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG, CEP: 38400-902

² Universidade Federal do Triângulo Mineiro, R. Frei Paulino, 30 – Nossa Sra. Da Abadia, Uberaba – MG, CEP: 38025-180

Resumo: O propósito deste trabalho consiste na implementação de técnicas de controle ativo de ruído em sistemas vibro-acústicos utilizando material piezoelétrico, visando superar as limitações dos sistemas de controle passivo convencionais existentes atualmente que se mostram ineficazes para as baixas frequências e inadequados para aplicações em salas limpas. Uma vez que os materiais piezoelétricos sintéticos podem ser facilmente aderidos a estruturas de geometria complexa, operam tanto nas baixas quanto nas altas frequências e apresentam relativa insensibilidade a temperatura, tornando-os capazes de operar mesmo em condições ambientais mais severas, tais dispositivos se mostram interessantes para aplicações acústicas em substituição aos atuadores convencionais do tipo alto-falantes na promoção do controle ativo de ruído (CAR). Sendo assim, neste trabalho foram implementadas técnicas de CAR no programa Matlab-Simulink[®] com o auxílio de um sistema de aquisição de dados dSPACE[®] com o objetivo de atenuar ruído na baixa frequência em um tubo de impedância utilizando como atuador de controle uma placa instrumentada com material piezoelétrico.

Palavras-chave: Controle ativo de ruído, materiais piezoelétricos, ruído em baixas frequências

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório mundial da saúde disponibilizado pela OMS (Organização Mundial de Saúde) a exposição excessiva ao ruído ocupacional é responsável por provocar cerca de 16% de perda auditiva no mundo, sendo portanto, um dos riscos ocupacionais mais comuns que atinge principalmente os países em desenvolvimento. Estudos apontam que além da perda auditiva, a exposição prolongada a níveis elevados de ruídos podem provocar também diversos efeitos psicológicos e fisiológicos indesejados tais como o aumento da pressão arterial, a perturbação do sono, stress, tensão, baixo desempenho na execução de tarefas e interferência na comunicação oral, conforme expõe Bistafa (2011).

Consequentemente, um dos maiores desafios enfrentados pela indústria consiste em reduzir o ruído a níveis aceitáveis, atendendo as normas vigentes no país, de forma a garantir a saúde e o bem estar, não apenas de seus funcionários, mas de toda a comunidade vizinha.

Uma das formas de se reduzir o ruído a níveis aceitáveis é a utilização de técnicas de controle que podem ser ativas ou passivas. De acordo com Maciel (2014), no método passivo a atenuação do ruído é obtida basicamente por meio da absorção e dissipação da energia interna dos materiais, enquanto no método ativo são usados dispositivos capazes de fornecer energia ao sistema com a mesma amplitude do ruído produzido pela fonte primária, no entanto, defasado de 180 graus, baseado no princípio da interferência destrutiva de ondas, conforme ilustra a Fig. 1.

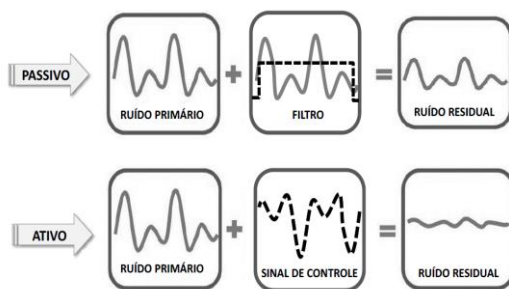


Figura 1. Método de controle de ruído. Fonte: Maciel (2014).

Apesar dos métodos passivo convencionais de controle de ruído apresentarem excelente relação custo benefício para atenuação nas altas frequências, os mesmos possuem respostas caras e ineficazes nas baixas frequências (Elliot e Nelson, 1993) e se mostram inadequados para aplicações em determinados ambientes, tais como as salas limpas. As salas limpas são ambientes controlados, dotados de sistema de manutenção de qualidade do ar interior, visando garantir os níveis de contaminantes e particulados abaixo dos limites especificados por norma (NBR ISO 14644), para as quais não são permitidas a aplicação de materiais acústicos absorventes, uma vez que os mesmos são porosos.

Já que as salas limpas estão presentes em diversos setores industriais (farmácia/ cosmético, alimentício, automobilístico, tecnologia da comunicação/ eletrônica, microeletrônica) e que para as mesmas a aplicação das técnicas de controle passivo de ruído convencionais disponíveis são inviáveis, faz-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas capazes de superar estas limitações. Com o avanço da ciência e da engenharia de materiais já existem no mercado forros e até mesmo tintas, que utilizam nanotecnologia, capazes de promover o tratamento acústico de recintos, inclusive dos ambientes controlados que apresentam atenuação considerável na altas frequências. Todavia, considerando que as técnicas de CAR estão sendo impulsionadas pelo processamento digital de sinais, conforme aponta Nise (2009), pelo crescimento da microeletrônica e pela melhoria dos transdutores de controle, faz-se interessante o desenvolvimento de novas propostas de atenuação ativa de ruído.

Uma das propostas atuais para controle ativo de vibrações consiste na utilização dos chamados materiais inteligentes visto serem elementos bastante versáteis uma vez que são leves, possuem tamanho reduzido e podem ser facilmente aderidos sobre a superfície da estrutura ou diretamente inseridos no volume do material, podendo operar em um sistema tanto como sensores quanto como atuadores, conforme evidencia Santana (2002). Sendo assim, tais dispositivos se mostram uma alternativa interessante para aplicações acústicas em substituição aos alto-falantes.

Destarte, a vista do exposto, o principal objetivo deste trabalho consiste na implementação de técnicas de CAR em sistemas vibro-acústicos utilizando placas instrumentadas com dispositivos piezoelétricos para atenuação de baixas frequências a fim de superar as limitações existentes atualmente em ambientes tais como as salas limpas.

2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

De acordo com Faria (2006), o efeito piezoelétrico direto foi observado inicialmente em 1917 pelo mineralogista francês René Just Haüy em um cristal de turmalina tensionado. No entanto, foi apenas em 1880, que os irmãos Curie fizeram a primeira publicação acerca do efeito piezoelétrico direto e validaram posteriormente, em 1881, experimentalmente, o efeito piezoelétrico inverso, proposto com base em análises termodinâmicas por Lippmann.

Dessa forma, de acordo com Santana (2002), o efeito piezoelétrico direto consiste na polarização elétrica, ou na distribuição de cargas elétricas produzidas pelo material piezoelétrico, quando este é solicitado de forma a sofrer uma deformação mecânica. Já o efeito inverso ocorre quando um campo elétrico é aplicado a um material piezoelétrico, provocando alterações em sua forma, proporcionais a este campo aplicado.

Desde então, com o desenvolvimento dos materiais piezoelétricos sintéticos (PZT's - cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo e dos PVDF - Polímeros Fluoreto de Polivinilideno) a utilização de tais dispositivos em diversos setores tem aumentado significativamente. Uma aplicação acústica dos PZT's, de interesse a este trabalho, pode ser observada nos dispositivos denominados piezo buzzer, ilustrado na Fig. 2. O piezo buzzer consiste em uma fina camada de material piezoelétrico aderido a uma membrana metálica que quando submetido a uma tensão alternada, provoca flexões periódicas na membrana (efeito direto) fazendo com que o sistema vibre na frequência de excitação produzindo som, com intensidade suficiente para muitas aplicações práticas.



Figura 2. Piezo buzzer.

No tocante a aplicação de materiais piezoelétricos para controle ativo de vibrações, um dos percussores no estudo foi Dimitriadis et al (1989), que utilizou atuadores piezoelétricos para reduzir a pressão sonora radiada por placas finas. Posteriormente Fuller et al (1991) constatou que em regiões próximas às suas frequências naturais, placas instrumentadas com PZT's, eram capazes de oferecer uma redução global do nível de ruído de 45 dB para os dois primeiros harmônicos, abrindo, assim, grandes possibilidades para a utilização de tais materiais no campo vibro-acústico.

3. CONTROLADORES ATIVOS DE RUÍDO

Os Controladores Ativos de Ruído (CAR) se dividem em dois grandes grupos, que são: os controladores em malha aberta (*feedforward*) capazes de cancelar tanto ruído de banda estreita, quanto de banda larga e os controladores em malha fechada (*feedback*) mais eficiente no controle de ruídos periódicos. A combinação das técnicas de controle *feedforward* e *feedback* resulta em uma configuração de controlador híbrido, que para algumas aplicações apresentam uma maior eficiência quando comparado com estas técnicas aplicadas isoladamente.

Basicamente, o sistema *feedforward* consiste em um CAR em malha aberta, que utiliza um sensor de referência, para adquirir o sinal primário, que deverá ser cancelado, e um sensor de erro, responsável por monitorar o desempenho do controlador. Já o sistema *feedback*, consiste em um controlador do tipo malha fechada, que utiliza apenas um sensor de erro para obter as informações necessárias para o cálculo do controlador a partir do qual será gerado o sinal de alimentação do atuador de controle (Nuñez, 2005).

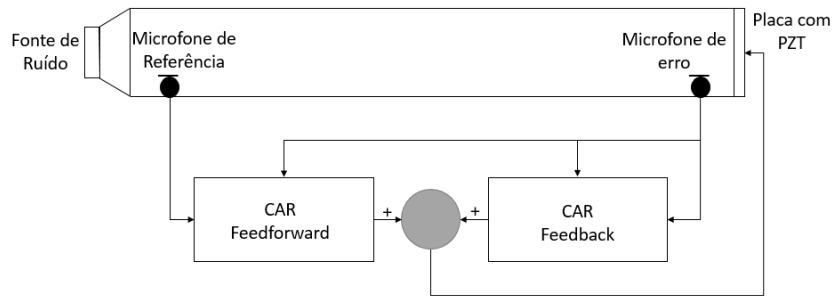


Figura 3. Sistema híbrido de controle ativo de ruído.

A Figura 3 ilustra a configuração do CAR FXLMS híbrido utilizado neste trabalho, nota-se que o CAR *feedforward* atenua o ruído primário e o CAR *feedback* cancela as componentes do ruído não observadas pelo sensor de referência.

Na Figura 4, mostra-se o diagrama de blocos de um sistema de controle híbrido.

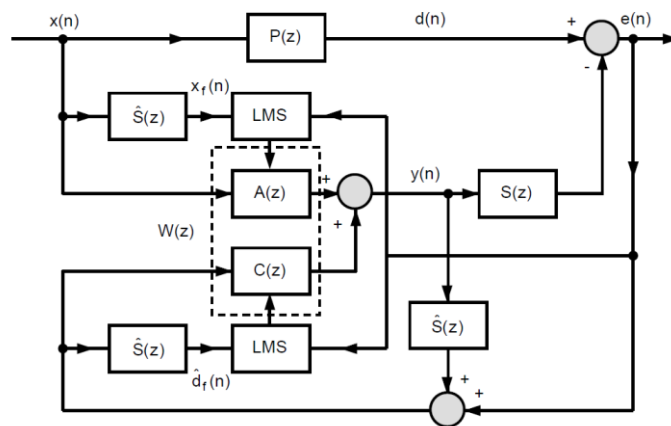


Figura 4. Diagrama de blocos do CAR Híbrido FXLMS.

Onde:

$x(n)$: Sinal de referência na entrada do controlador

$d(n)$: Sinal do microfone de erro procedente da fonte de ruído (ruído primário)

$y(n)$: Sinal de saída do controlador

$e(n)$: Sinal de erro

$W(z)$: Filtro digital

$A(z)$: Filtro do CAR *feedforward*

$C(z)$: Filtro do CAR *feedback*

$P(z)$: Função de transferência entre a fonte de ruído e o microfone de erro (caminho primário)

$S(z)$: Função de transferência entre o atuador (placa dotada de material piezoelétrico) e o microfone de erro (caminho secundário)

$\hat{S}(z)$: Estimativa da função de transferência entre o atuador (placa dotada de material piezoelétrico) e o microfone de erro (caminho secundário)

$\hat{d}(n)$: Estimativa do sinal primário

$X_f(n)$ e $\hat{d}_f(n)$: Versões filtradas dos sinais de referência usadas para adaptar os coeficientes dos filtros $A(z)$ e $C(z)$, respectivamente

No CAR a função de transferência $S(z)$, denominada caminho secundário, é responsável por fornecer informações ao controlador não apenas do caminho acústico, mas da presença de ruídos produzidos pela eletrônica do sistema (por exemplo: os conversores D/A e A/D, amplificadores de potência, alto-falantes, microfones, etc.), apresentando efeito importante no desempenho do controlador.

A estimativa do caminho secundário pode ser realizada de maneira *off-line* ou *online*, sendo a primeira indicada para funções com características invariantes no tempo e a segunda consequentemente para as variantes. Das diversas técnicas existentes para estimação deste caminho, neste trabalho optou-se pela maneira *off-line* utilizando uma aproximação polinomial por um modelo ARX. A formulação do modelo ARX empregado, conforme Aguirre (2000), é apresentada na Eq. (1).

$$A(k) \cdot y(t) = B(k) \cdot u(t - q) \quad (1)$$

Expandindo o modelo ARX e isolando o termo $y(t)$, tem-se:

$$y(t) = [b_1 \cdot u(t - q) + b_2 \cdot u(t - q - 1) + \dots + b_{nb} \cdot u(t - q - nb + 1)] - [a_1 \cdot y(t - 1) + a_2 \cdot y(t - 2) + \dots + a_n \cdot y(t - na)] \quad (2)$$

Onde:

na: número de pólos

nb: número de zeros somado a uma unidade

q: atraso de tempo do sistema

Sendo assim, por meio da análise da equação (2) percebe-se que o modelo ARX relaciona a saída atual, $y(t)$, a um número finito de saídas, $y(t-k)$, e entradas passadas, $u(t-k)$. Os coeficientes, $A(k)$ e $B(k)$, são encontrados minimizando o erro quadrático entre a saída estimada e a saída real do caminho secundário. Experimentalmente, os coeficientes são estimado com o auxílio do pacote de identificação de sistemas disponibilizado pelo *programa* Matlab®, utilizando os sinais de erro e de alimentação adquiridos em um ensaio com uma excitação do atuador de controle com um ruído branco, tal como ilustra a Fig. 5.

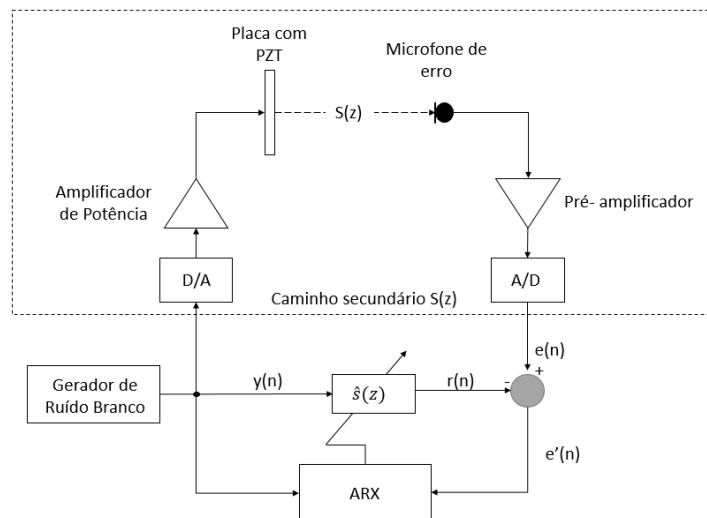


Figura 5. Estimativa *off-line* do caminho secundário.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realizar o CAR, proposto neste trabalho, montou-se uma bancada experimental composta por um tubo de impedância de acrílico instrumentado com um piezo buzzer colado a uma placa de alumínio (atuador de controle), alto-

falante (fonte de ruído), microfones, condicionadores de sinais e um computador acoplado a uma placa de controle dSPACE® modelo DS1104 e *programa* Matlab-Simulink®, conforme ilustra a Fig. 6.

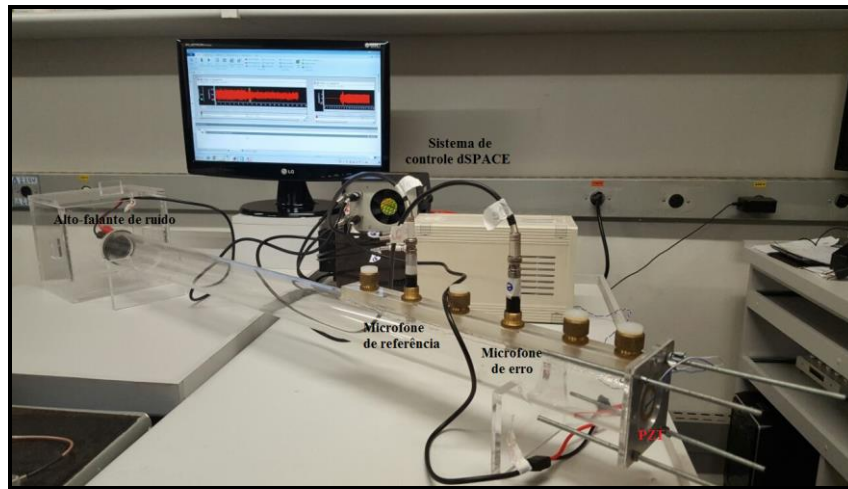


Figura 6. Bancada experimental.

Para fazer a aquisição dos sinais, foram utilizados condicionadores de sinais e microfones de campo livre da PCB pré-amplificado do modelo 377B02 de ½" com sensibilidade de 50 mV/Pa e faixa de frequência de 5 a 10 kHz (± 1 dB).

A Figura 6 mostra a bancada experimental, na qual acoplou-se em uma das extremidades do tubo de acrílico o alto-falante que caracteriza a fonte de ruído a ser controlada e na outra extremidade a placa com piezo buzzer (PZT). Sendo os microfones de referência e erro posicionados a 279 mm e 153 mm do atuador de controle, respectivamente.

O alto-falante, utilizado no ensaio experimental como fonte de ruído, apresenta impedância de 8Ω e potência máxima de 15W RMS. Para realizar a interface entre o alto-falante e a plataforma de controle dSPACE utilizou-se um amplificador de áudio com circuito integrado monolítico TDA2030, classe AB de baixa frequência. Esses circuitos são capazes de fornecer até 12W de potência em alto-falantes de 4Ω e 8W em 8Ω .

O atuador empregado no CAR, ilustrado na Fig. 7, consiste em um piezo buzzer, cujas especificações fornecidas pelo fabricante se encontram na Tab. 1, colado no centro de uma placa de alumínio devidamente projetada para ser fixada na extremidade do tubo de impedância.

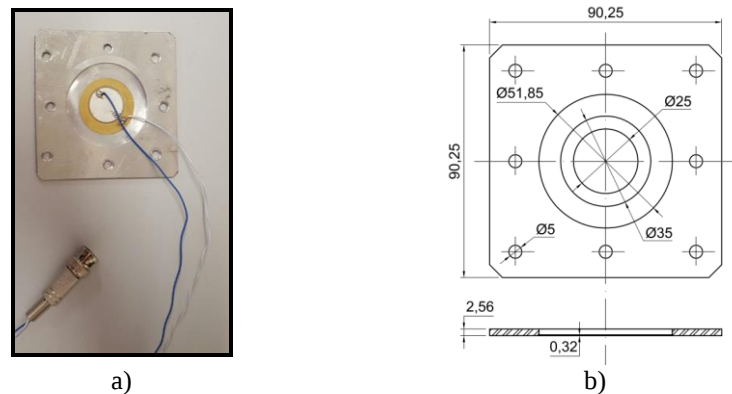


Figura 7. Atuador piezo buzzer utilizado no sistema de controle:
a) Foto do PZT e b) Dimensões geométricas [mm].

Tabela 1. Especificações piezo buzzer.

Parâmetros	Valores
Frequência de ressonância (Hz)	2.800 ± 500
Impedância de ressonância máxima (Ohm)	300
Máxima tensão de entrada (Vp-p)	30
Capacitância em 1 kHz (pF)	$30.000 \pm 30\%$
Material da placa	Latão
Temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$)	$-20 \sim +60$
Temperatura de armazenamento ($^{\circ}\text{C}$)	$-20 \sim +70$

Os algoritmos de controle foram desenvolvidos no *programa* Matlab-Simulink® e implementados por meio da placa de controle dSPACE DS1104, da qual utilizou-se dois canais de conversão analógico digital (A/D), com 16 bits de resolução, modo *sample and Hold* (S/H) e tensão de entrada de ± 10 V para aquisição dos sinais provenientes dos microfones e dois canais de conversão digital analógica (D/A) com resolução de 16 bits, saída de ± 10 V e corrente máxima de ± 5 mA para acionar os atuadores da planta. A frequência de amostragem utilizada foi de 2 kHz.

5. RESULTADOS

Para testar o desempenho do piezo buzzer colado em uma placa de alumínio como atuador do CAR foram realizados testes com os controladores do tipo *feedback*, *feedforward* e híbrido utilizando perturbações do tipo mono tonal nas frequências de 200, 300, 400 e 500 Hz.

Nos testes realizados, os processos de controle eram ativados após 6 segundos do início da excitação do sistema. Os resultados obtidos nos ensaios em função do tempo com o microfone de erro estão mostrados na Fig. 8.

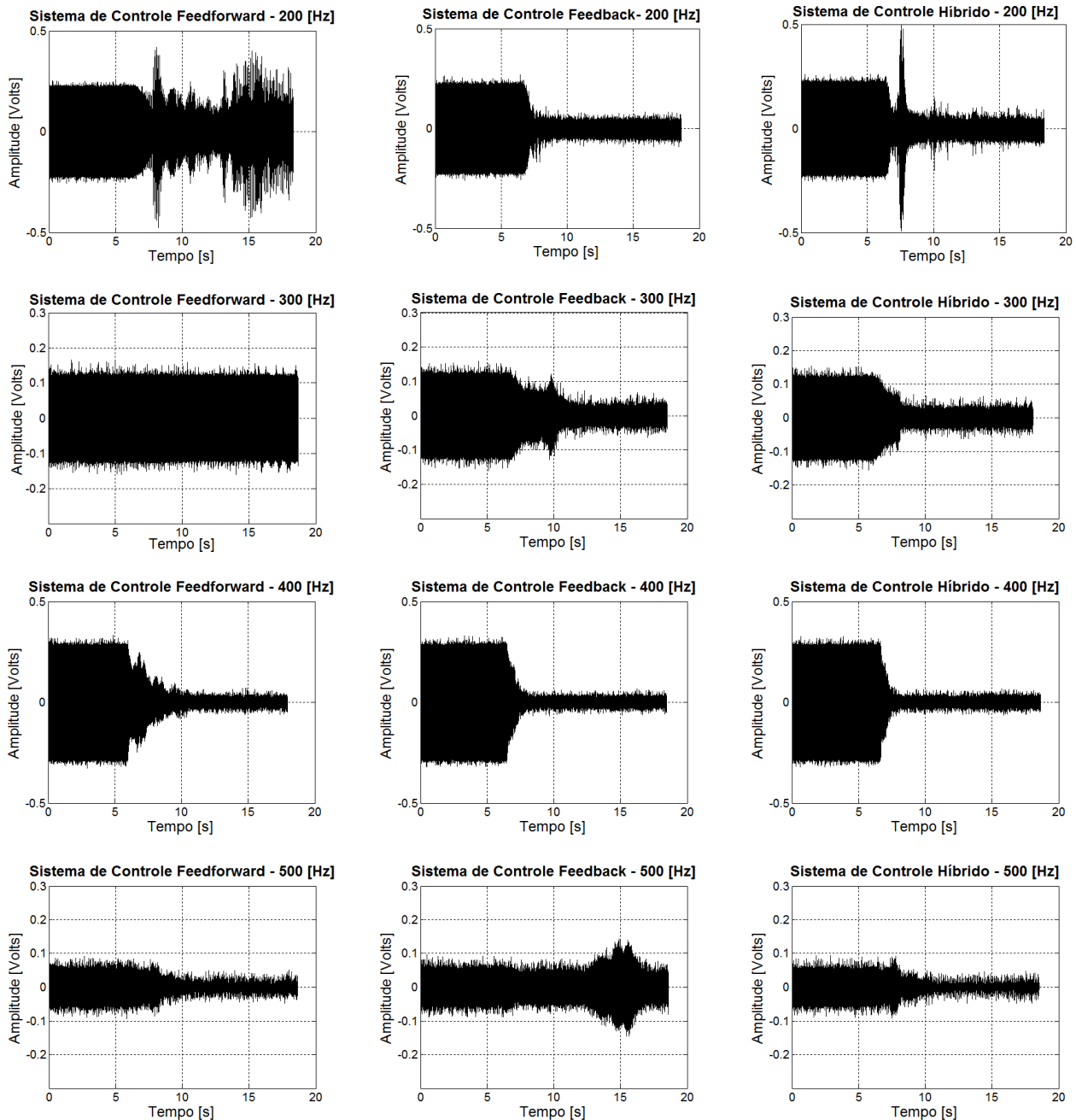


Figura 8. Sinais do microfone de erro.

Nota-se que os resultados obtidos empregando técnicas de controle do tipo *feedforward* não foram satisfatórios para as frequências de 200 e 300 Hz, uma vez que em 200 Hz o sistema de controle divergiu e em 300 Hz o controlador não provocou qualquer redução na amplitude do sinal de erro no tempo observado. No entanto em 400 e 500 Hz verifica-se

que o controlador *feedforward* promoveu uma redução significativa do nível de ruído do sistema, apresentando bom desempenho.

Já o controlador *feedback* mostrou uma boa performance nos ensaios realizados para as frequências de 200 a 400 Hz, mas não promoveu a atenuação do sinal em 500 Hz, apresentando-se instável. Finalmente, constata-se por meio dos dados obtidos nos ensaios com o CAR híbrido que este foi o único sistema de controle que se mostrou estável para todas as frequências analisadas neste trabalho, reduzindo consideravelmente o nível de ruído observado pelo microfone de erro.

Visto que dentre os controladores analisados o híbrido foi o único capaz de controlar todas as frequências de interesse, a Fig. 9 apresenta a densidade espectral de potência em 300 Hz para o sistema antes e depois da ação do controlador a fim de verificar a atenuação proporcionada pelo mesmo.

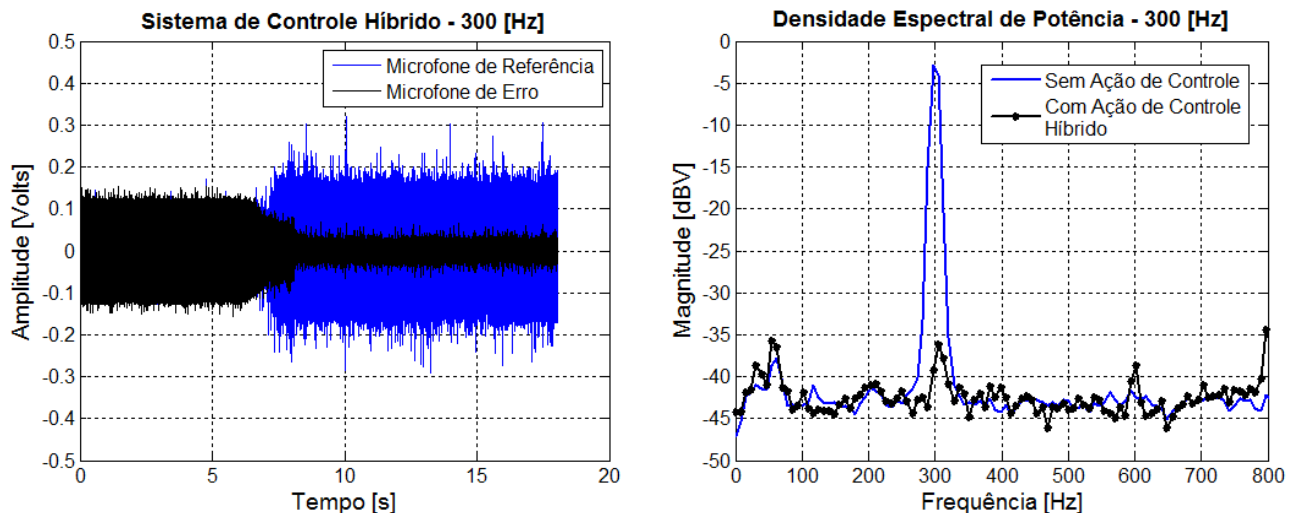


Figura 9. Densidade espectral do erro para o ensaio híbrido a 300 Hz.

Analisando a Fig. 9, verifica-se que o controlador híbrido praticamente anula o ruído na região próxima ao microfone de erro, apresentando uma atenuação superior a 30 dBV.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se experimentalmente as técnicas de controle ativo de ruído na baixa frequência utilizando uma placa de alumínio instrumentada com um piezo buzzer, placa de controle dSPACE DS1104 e programa Matlab-Simulink®. Foram testados os controladores do tipo *feedback*, *feedforward* e híbrido para excitações do tipo mono tonais nas frequências de 200 a 500 Hz.

As respostas obtidas, nos ensaios realizados, mostram que os piezo buzzer são capazes de operar como atuadores nos sistemas de controle ativo promovendo atenuação do ruído para excitações do tipo mono tonais sendo, portanto, uma alternativa interessante para aplicações acústicas.

Conclui-se ainda, que dentre os CAR avaliados experimentalmente neste trabalho o sistema híbrido foi o que teve melhor performance sendo o único controlador estável para todas as frequências analisadas. No entanto, os controladores *feedforward* e *feedback* em algumas frequências também apresentaram redução significativa do nível de ruído do sistema.

Como desdobramentos futuros deste trabalho, tem-se a investigação da resposta do piezo buzzer face a outras formas de excitações (multi tonal e ruído branco), aplicação em sistemas de controle multi canais; utilização de uma placa instrumentada com mais de um piezo buzzer e otimização do posicionamento dos atuadores no sistema de controle.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior (CAPES), a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEST) por disponibilizar a estrutura e os recursos necessários para a realização deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

Aguirre, L. A. Introdução à identificação de sistemas. Ed. UFMG, Belo Horizonte-MG, 2000.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DDE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14644-1: Salas limpas e ambientes controlados associados. Parte 1: Classificação da limpeza do ar. Rio de Janeiro, 2005.
- Bistafa, S. R. Acústica aplicada ao controle do ruído. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 380 p.
- Dimitriadis, E.K. Fuller, C.R. Rogers, C.A. Piezoelectric actuators for distributed noise and vibration excitation of thin plates. In: Biennial conference on failure prevent and reliability, 8 th, 1989, Montreal, Quebec, Canada. p. 223-233.
- Elliot, S. J. and Nelson, P. A., Active Noise Control, IEEE Signal Processing Magazine, October, 1993.
- Faria, A. W. Modelagem por elementos finitos de placas compostas dotadas de sensores e atuadores piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica. 2006. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016
- Fuller, C.R. Hansen, C.H. Snyder, S.D. Active noise control of sound radiation from a vibrating rectangular panel by sound sources and vibration inputs: An experimental comparison. Journal of Sound and Vibration, v. 145 (2) p.195-215, 1991.
- Maciel, M. A. Controle ativo de ruído aplicado a venezianas acústicas. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- Nise, N. S. Engenharia de Sistemas de Controle. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- Núñez, I. J. C., Cardoso, P. M. e Ribeiro, J. F., Controle ativo de vibrações utilizando algoritmo FXLMS feedforward. CBA 2004, 2004.
- Núñez, I. J. C. O controle ativo de ruído em dutos: um estudo teórico experimental. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- Santana, D. C., Controle ativo de ruído empregando placas retangulares com atuadores piezoelétricos distribuídos, 198 p., Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- World Health Organization. The word health report: Reduncing risk, promoting healthy life. França, 2002. Disponível em : <http://www.who.int/whr/2002/chapter4/en/>. Acesso em: 26 de março de 2016.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ACTIVE NOISE CONTROL AT LOW FREQUENCY IN DUCTS USING PIEZOELECTRIC MATERIAL

Fabiana Alves Pereira, fabianaapereria@yahoo.com.br¹

Geisa Arruda Zuffi, geisazuffi.gz@gmail.com¹

Israel Jorge Cárdenas Nuñez, israel.nunez@mecanica.ufm.edu.br²

Marcus Antonio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG, CEP: 38400-902

² Universidade Federal do Triângulo Mineiro, R. Frei Paulino, 30 – Nossa Sra. Da Abadia, Uberaba – MG, CEP: 38025-180

Abstract *The purpose of this work is implement active control techniques in vibro-acoustic systems using piezoelectric material to promote noise attenuation, aiming to overcome the limitations of conventional passive control systems that are ineffective at low frequencies and unsuitable for applications in clean rooms. Since the synthetic piezoelectric materials can be easily adhered to geometrically complex structures, operate both in low and in the high frequencies and exhibit relative insensitivity to temperature, making them able to operate even in more severe environmental conditions, such devices are interesting for acoustic applications in replacement of the loudspeakers in the promotion of active noise control (CAR). Therefore, in this study, was implemented a hybrid FXLMS active controller in Matlab software-Simulink® with the aid of a data acquisition system dSPACE® in an impedance tube using such an instrumented control actuator plate with piezoelectric material aiming to attenuate noise at low frequency.*

Keywords: Active noise control, piezoelectric material, low frequency noise