



20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Projeto de sistema de controle ativo de ruído aplicado a dutos com grandes seções transversais

Autor:
Eider Lúcio de OLIVEIRA

Orientador:
Marcus Antônio Viana DUARTE
Co-orientador:
José Luiz de Oliveira PENA

Introdução

A presença de dutos em plantas industriais para viabilizar a ventilação ou exaustão tem como consequência um sinal sonoro indesejado que pode causar malefícios à saúde de trabalhadores e às pessoas que moram nas imediações das fábricas. Esse ruído é gerado pela passagem das pás do exaustor por elementos fixos da estrutura, sendo um ruído de banda estreita (ou tom puro) com presença de harmônicos. Há também um sinal aerodinâmico do tipo banda larga, gerado em regiões de fluxo turbulento e vórtices. Finalmente, existe ainda o ruído de origem mecânica, emitido por vibrações dos componentes estruturais e das pás. A maior parte da energia desse sinal está presente na faixa de frequência de 0 a 500 Hz, onde os sistemas de Controle Ativo de Ruído (CAR) são eficientes (HANSEN et al, 2007). A Figura 1 mostra os elementos presentes em um sistema CAR mono-canal.

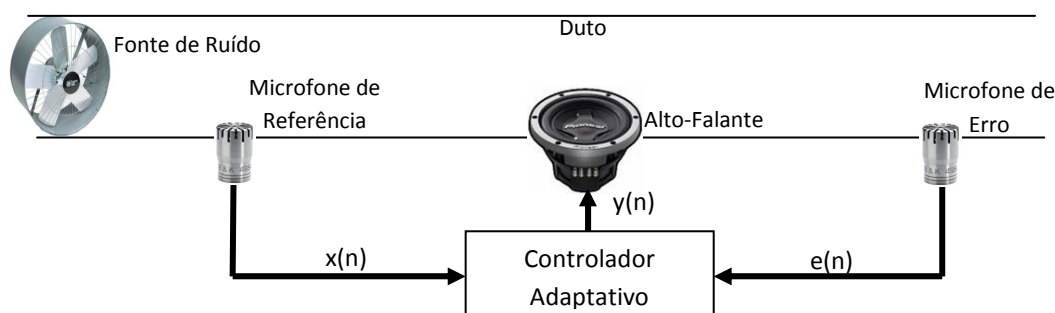


Figura 1 – Elementos que compõem um sistema de cancelamento ativo de ruído.

O CAR é um sistema eletroacústico usado para atenuar um campo sonoro primário através de um sinal de mesma amplitude e em oposição de fase com relação ao sinal indesejado. Esse sinal, gerido por unidade eletrônica, é reproduzido por fonte de controle (alto-falante) de forma que, ao ser combinado com o ruído gerado pela fonte primária, resulta no cancelamento de ambos os ruídos. A técnica mono-canal tem sido

aplicada a décadas a dutos onde predomina o modo acústico fundamental ou ondas planas. A redução do nível de ruído alcança bons resultados quando utiliza os processadores digitais de sinais (DSPs), para implementar filtros adaptativos em tempo real; sensores, para fazer o ajuste do sistema de controle e atuador, para realizar o cancelamento do sinal acústico. Na atual fase de desenvolvimento tecnológico, os custos desses sistemas já estão bem reduzidos, sendo possível uma aplicação mais efetiva no campo industrial.

O uso de sinal de referência e sinal de erro, mostrado na Fig. 1, caracteriza uma configuração de controle malha aberta, conhecida como *feedforward* e utilizada neste trabalho. Essa estratégia permite atuação do controlador em uma faixa larga do espectro, atuando com eficiência até 500Hz. O algoritmo adaptativo trabalha *on line* na busca de coeficientes de um filtro digital que melhor represente o sistema acústico em questão. O algoritmo utilizado é baseado no LMS (*Least Mean Square*).

Os dutos encontrados nas indústrias geralmente têm grandes seções transversais. Essa característica faz com que a propagação da onda sonora, no seu interior, apresente modos acústicos de alta ordem. Assim, o CAR para dutos industriais são comumente desenvolvidos a partir de um sistema de controle multicanal. Uma das regras do CAR diz que para cada modo a ser controlado deve existir um sistema de controle atribuído ao mesmo. Sendo assim, para cada n modos existentes, deve haver n atuadores e n sensores (ELLIOTT, 2001). Com isso, esses sistemas utilizam múltiplas fontes de controle (alto-falantes) e múltiplos sensores de referência e erro (microfones).

Devido às dificuldades de implementação de um sistema multicanal, tendo em vista a importância dos sistemas de exaustão e tubulações nas indústrias e considerando ainda que esses dispositivos são fontes de ruído altamente significativas, Nunes (2009) desenvolveu uma metodologia para ser utilizada em dutos com modos de propagação de alta ordem, onde o controle ativo é realizado por sistemas do tipo mono-canal. Assim, o CAR foi desenvolvido para ondas planas para se aproveitar as facilidades e bons resultados desse projeto. Tal metodologia caracteriza-se pela inserção de dutos concêntricos (para seção transversal circular) ou placas (para seção transversal retangular) no interior do duto principal, de forma que as ondas entre os dutos (ou placas) tornem-se planas. Dessa maneira, após a colocação de n dutos, têm-se $n+1$ sistemas de controle mono-canal, onde a implementação e controle dos seus parâmetros são menos complexos que se comparados com um sistema multicanal.

A Figura 2 mostra um duto com comprimento L_z e seção transversal retangular L_x por L_y , onde a divisão interna é realizada pela inserção de uma placa. O duto (a) é a configuração inicial do problema. No duto (b) é colocada a placa divisória para que os modos de alta ordem tornem-se planos no interior das cavidades.

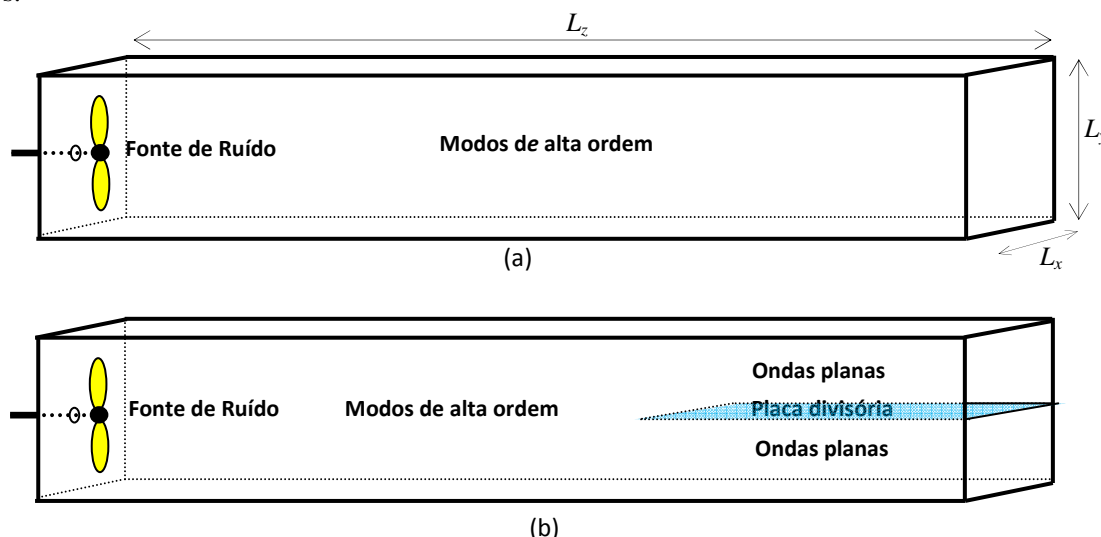


Figura 2 - Metodologia para duto de dimensões $L_z \times L_x \times L_y$ com seção transversal retangular com (a) duto sem divisão interna e (b) duto com divisão interna.

O presente trabalho procura definir as principais etapas de um projeto CAR para dutos com grandes seções transversais. São abordados o estudo do sistema acústico utilizando método de elementos finitos (MEF), a otimização da posição dos elementos de controle, utilizando algoritmos genéticos, e implementação de um sistema mono-canal para ser usado posteriormente em dutos maiores utilizando a técnica de divisão interna para planificação das ondas sonoras.

Propagação de Ondas Acústicas em Dutos

Para o duto retangular uniforme da Fig. 2(a), observa-se que a maior dimensão da seção transversal é L_y . Sabendo que c_o é a velocidade do som no ar, tem-se a frequência de corte para o duto dada por:

$$f_c = \frac{c_o}{2.L_y} \quad (1)$$

A frequência de corte de um duto define o limite para propagação de ondas planas (modo fundamental). Quando a frequência de excitação do sistema torna-se alta, conseqüentemente seu comprimento de onda torna-se comparável com as dimensões de sua seção transversal. Então, não somente ondas planas propagam-se no interior do mesmo, mas também os modos de alta ordem (ELLIOTT, 2001).

A utilização da Eq. 1 com velocidade do som no ar (c_o) de 342 m/s em um duto retangular e uniforme de comprimento (L_z) de 6 metros e lados de 1 metro e 0,5 metros (L_y e L_x , respectivamente), tem-se como frequência de corte o valor 171 Hz.

Partindo de um duto com propagação de ondas multimodal, será aplicada a metodologia de divisão interna e montagem de cavidades menores para que as ondas tornem-se unidimensionais dentro das mesmas. Dessa forma, pode-se utilizar o controle ativo mono-canal. A Figura 3 mostra a simulação em duas dimensões, usando MEF, do mesmo duto apresentado anteriormente, onde se podem comprovar formas de onda plana nas cavidades que surgem da divisão interna. A frequência de corte, nessas regiões, é de 342 Hz. Onde está aplicada a função de entrada $p(t)$, representa a entrada do duto. Na outra extremidade tem-se a saída do sinal propagando em um ambiente onde não existe reflexão, similar a uma câmara anecóica.

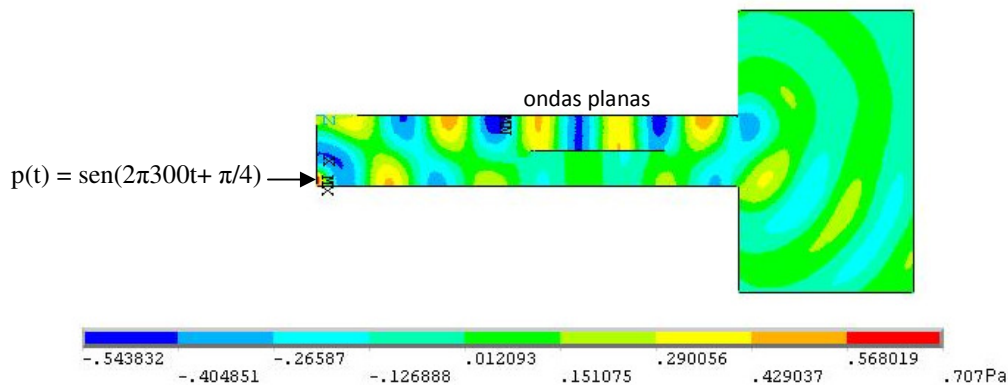


Figura 3 - Duto com excitação harmônica de 300 Hz apresentando modos de alta ordem e ondas planas.

Otimização no Controle Ativo de Ruído

Uma etapa importante do projeto CAR é a definição do valor de pressão de controle a ser entregue ao atuador e também a posição otimizada do mesmo. Nunes (2009) observou que a superfície de resposta associada ao sistema acústico em questão tem comportamento não-linear com grande quantidade de mínimos locais. Assim, optou-se por utilizar o algoritmo genético para a localização dos parâmetros do sistema que minimizem a pressão acústica na saída do duto.

Implementação de Controle Ativo de Ruído Mono-canal

Para testar experimentalmente o sistema de controle apresentado, foi utilizada uma bancada constituída por um duto de PVC, instrumentado com alto-falantes e microfones de eletreto (CARDENAS, 2005 e DELFINO, 2005). A frequência de corte do duto é de 1335 Hz.

A placa DSK6713, da empresa *Texas Instruments*, foi utilizada para implementar o controle digital (filtro adaptativo), com programação realizada na linguagem C. As dimensões do duto e cada componente do sistema está mostrado na Fig. 4(a). A Figura 4(b) apresenta o resultado do sistema CAR com entrada harmônica na frequência de 220Hz. Um microfone foi instalado na saída do duto para medir uma atenuação de 35 dB.

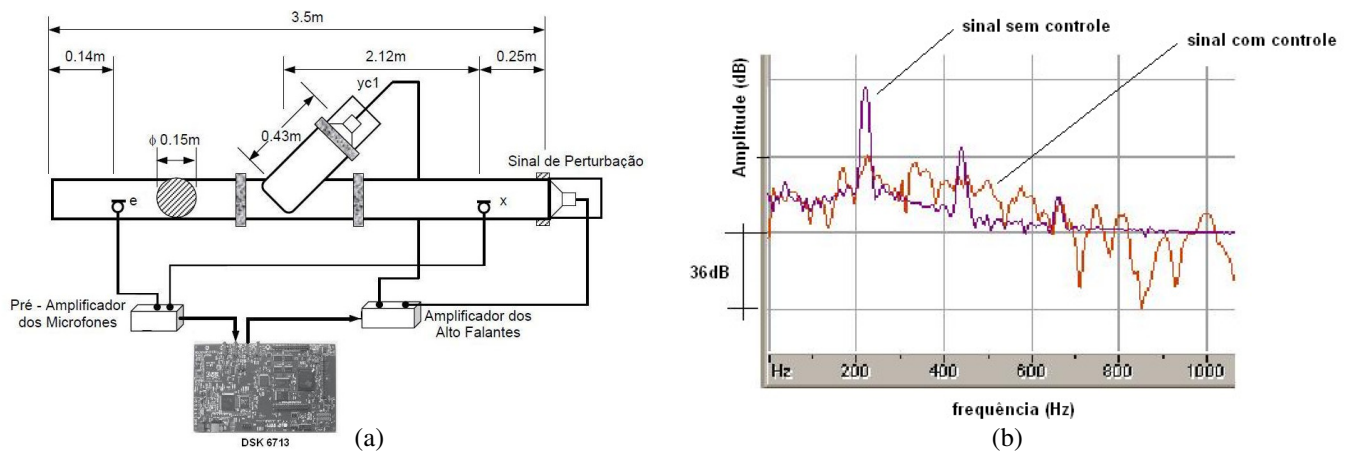


Figura 4 – (a) Bancada experimental de duto com propagação de ondas planas e controle ativo instalado e (b) resultado do sistema de controle no domínio da frequência.

Conclusões

O presente trabalho aborda o controle acústico em dutos com dimensões são encontradas nas indústrias. Para isso, é fundamental dividir esse sistema sonoro em outros subsistemas mais simples, para que a metodologia mono-canal, de natureza adaptativa, seja utilizada. De forma breve foram abordadas as várias áreas relacionadas com o projeto de um sistema CAR. Essas áreas foram estudadas, simuladas e implementadas e podem ser classificadas em:

- sistemas acústicos: envolve o estudo da propagação da onda acústica em dutos. A principal ferramenta utilizada é o método de elementos finitos;
- sistemas eletrônicos: principal papel é feito pela placa DSK 6713, que possui um DSP e que realiza a aquisição de sinais, o processamento da parte controle digital e gera sinais para o atuador; e
- sistemas de programação: separada ainda nas áreas de otimização (algoritmo genético) e controle adaptativo (algoritmo derivado do LMS).

A implementação de um sistema CAR mono-canal foi realizada e uma atenuação de 35 dB foi atingida.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo suporte financeiro a essa pesquisa.

Referências

- CARDENAS, N. I. **O controle ativo de ruídos em dutos: um estudo teórico - experimental**. Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- DELFINO, L. C. **Controle ativo de ruídos em dutos utilizando processadores digitais de sinais**. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- ELLIOTT, S. J. **Signal processing for active control**. Academic Press, 2001.
- HANSEN, C. H., QIU, X., PETERSEN, C., HOWARD, C., & SINGH, S. **Active Noise and vibration controlsystem design considerations**. Mechanics, 26 (2), 37-46, 2007.
- NUNES, M. A. A. **Utilização de síntese modal de componentes e particionamento axial de dutos para controle dos modos acústicos de alta ordem**. Tese, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.