



INFLUÊNCIA DO CONTROLADOR FILTERED-X LMS NAS IMPEDÂNCIAS DE UM DUTO

Lázaro Valentim Donadon*

Ronaldo Fernandes Nunes**

José Roberto de França Arruda*

José Maria Campos dos Santos*

*Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Mecânica Computacional
Cx.P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

**Mercedes-Benz do Brasil, Tecnologia de Cabinas e Conforto - TCC
Cx.P. 202 – 09680-900 – São Bernardo do Campo, SP, Brasil

Resumo. Nas últimas décadas o controle ativo de ruído vem ganhando cada vez mais espaço. Várias aplicações têm surgido, tal como o controle acústico de dutos. Da mesma forma que as aplicações, os métodos de controle também estão se tornando cada vez mais diversos e sofisticados. Atualmente um dos mais utilizados é o “Filtered-X LMS”. Este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento da impedância acústica em um duto observada pela fonte de perturbação quando o controlador está operando. O controlador foi implementado utilizando dois alto-falantes, um como fonte de perturbação posicionado axialmente e o outro alto-falante como fonte de controle posicionado transversalmente ao duto. As impedâncias foram coletadas através do quociente entre a pressão e a velocidade de volume. A pressão foi medida utilizando vários microfones ao longo do comprimento do duto enquanto a velocidade de volume foi medida utilizando um vibrômetro laser Doppler para medir a velocidade do cone do alto-falante de perturbação. Observou-se que o controle ativo com o algoritmo “Filtered-X LMS” altera significativamente as impedâncias. Em pontos espacialmente anteriores aos de controle ocorre uma suavização e em pontos de controle e pontos posteriores ocorre uma diminuição global da impedância, devido à diminuição nos níveis de pressão sonora.

Palavras-chave: Controlador Filtered-X LMS, impedâncias acústicas, dutos, Controle de ruído.

1 INTRODUÇÃO

Quando o controle ativo de ruído está atuando, a atenuação do ruído gerado pela fonte primária, ou de perturbação, é devido a um efeito destrutivo causado pela injeção de uma onda com fase oposta de uma fonte secundária ou de controle. Outras investigações têm sugerido que este cancelamento é devido a uma reflexão do ruído de volta para a fonte primária, sendo esta reflexão causada por uma alteração da impedância vista pela fonte

primária. Finalmente, outra forma de justificar o cancelamento é que a fonte de controle pode estar “descarregando” a fonte primária pela alteração da impedância de radiação, reduzindo assim toda potência de saída, (Snyder et al. 1989).

Este trabalho tem por objetivo verificar o que ocorre com a impedância “vista” pela fonte de perturbação quando o controle “Filtered-X LMS” está atuando.

2 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA EM UM DUTO

Em geral a impedância acústica, $Z = P/U$, de um fluido agindo em uma superfície S é o quociente complexo da pressão acústica P na superfície dividida pela velocidade de volume U , (Kinsler et al.,1982). Outras denominações são também utilizadas, como: impedância acústica específica, $z = p/u$, onde u é a velocidade de partícula, impedância de radiação, $Z_R = Sz$, que representa a força/velocidade, fazendo parte da Impedância Mecânica Z_m de um sistema vibrando associado com a radiação do som.

Para deduzir a expressão da impedância acústica de um duto reto será utilizada a impedância acústica específica. Para tanto, é necessário o conhecimento da pressão acústica e da velocidade de partícula, ambas definidas no domínio da frequência.

É fácil mostrar (Hansen et al., 1997), que a frequência de corte, $f_{cu} = 0,586c/d$, entre ondas planas e modelos de ordem elevada para um duto de seção circular, com $c = 343$ m/s e $d = 0.145$ metros, a f_{cu} está acima de 1,3 kHz. Como neste trabalho a máxima frequência utilizada foi de 1 kHz, pode-se assumir a hipótese de ondas planas.

Partindo da equação da onda linearizada e para ondas planas, Kinsler et al. (1982),

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (1)$$

onde x representa a coordenada de propagação da onda plana e c é a velocidade do som no meio. Resolvendo a Eq. (1) no domínio da frequência, encontra-se

$$\hat{P} = Ae^{ik(L-x)} + Be^{-ik(L-x)} \quad (2)$$

onde L representa o comprimento do duto, A representa a amplitude da onda incidente, B a amplitude da onda refletida e o número de onda $k = \omega/c$.

Agora, tomando a equação de Euler linearizada e admitindo ondas planas propagando na direção x ao longo do duto, Kinsler et al. (1982),

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

onde ρ_0 é a densidade do meio. Resolvendo no domínio da frequência para u , encontra-se

$$\hat{u} = -\frac{1}{i\omega\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (4)$$

Derivando a Eq. (2) em relação a x ,

$$\frac{\partial \hat{P}}{\partial x} = -ikAe^{ik(L-x)} + ikBe^{-ik(L-x)} = -ik[Ae^{ik(L-x)} - Be^{-ik(L-x)}] \quad (5)$$

Substituindo a Eq. (5) na Eq. (4), a velocidade de partícula é dada por

$$\hat{u} = \frac{1}{i\omega\rho_0} ik[Ae^{ik(L-x)} - Be^{-ik(L-x)}] \quad (6)$$

Substituindo as Eq. (6) e Eq. (2) na equação da impedância acústica específica e assumindo $c = \omega/k$, encontra-se então a impedância acústica específica na forma

$$z = \frac{P}{u} = \rho_0 c \frac{Ae^{ik(L-x)} + Be^{-ik(L-x)}}{Ae^{ik(L-x)} - Be^{-ik(L-x)}} \quad (7)$$

Assumindo que em $x = 0$ o duto possui um pistão rígido (o alto-falante em baixa frequência funciona como um pistão rígido), em $x = L$ o duto é aberto, então sua impedância mecânica Z_{mL} é igual a impedância de radiação Z_R . Aplicando a condição de contorno em $x = L$ na Eq. (7), tem-se

$$Z_{mL} = Z_R = Sz(L) = \rho_0 cS \frac{A+B}{A-B} \quad (8)$$

Resolvendo a Eq. (8) para A/B encontra-se

$$\frac{A}{B} = \frac{Z_{mL} + \rho_0 cS}{Z_{mL} - \rho_0 cS} \quad (9)$$

De acordo com Kinsler et al. (1982) se forem considerados ondas planas e para dutos não flangeados, tem-se que

$$Z_{mL} = \rho_0 cS(0.25(ka)^2 + i0.6ka) \quad (10)$$

3 CONTROLADOR “FILTERED-X LMS”

Um diagrama esquemático do controlador adaptativo de alimentação direta “*Filtered-X LMS*” pode ser observado na Figura 1.

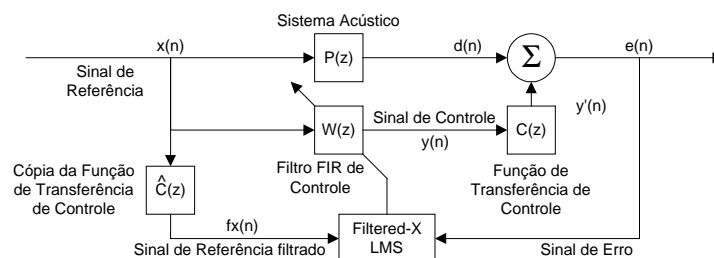


Figura 1 – Diagrama de blocos do controlador Filtered-X LMS

Na Figura 1, $P(z)$ representa a planta acústica passiva entre a fonte de perturbação $x(n)$ e o ponto onde o ruído deve ser cancelado, $C(z)$ representa a planta acústica de controle entre a resposta do filtro $y(n)$ e o ponto onde o ruído deve ser cancelado, $\hat{C}(z)$ representa uma estimativa da planta de controle $C(z)$. De acordo com Kuo et al. (1996), a planta $C(z)$ deve englobar todos os efeitos dos conversores A/D e D/A, amplificadores, sensores, filtros, condicionadores e o próprio meio acústico.

De acordo com Haykin (1996) um processo de filtragem adaptativa consiste de dois processos básicos: um processo de filtragem, o qual processa ou “filtra” um sinal desejado, e a presença de um algoritmo adaptativo, que ajusta o filtro de acordo com uma determinada função de custo.

De acordo com Kuo et al. (1996) e Widrow et al. (1985) deve-se assumir que a resposta da planta $d(n)$ e a excitação ou perturbação $x(n)$ são estatisticamente estacionárias.

O processo de filtragem do método pode ser definido como

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (11)$$

Onde $y(n)$ representa a resposta do filtro, $\mathbf{w}(n)$ o vetor de pesos do filtro, $\mathbf{x}(n)$ o sinal de referência, L o número de pesos do filtro, n o instante de tempo com

$$\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \quad w_1(n) \quad \cdots \quad w_{L-1}(n)]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{x}(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \cdots \quad x(n-L+1)]^T \quad (13)$$

A função de custo do “Filtered-X LMS” é o quadrado do erro $e(n)$, e, de acordo com a Figura 1, observa-se que o erro $e(n)$ é definido por

$$e(n) = d(n) - y'(n) = d(n) - \mathbf{c}(n) * y(n) = d(n) - \mathbf{c}(n) * [\mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n)] \quad (14)$$

Onde $\mathbf{c}(n)$ é a resposta ao impulso da planta $C(z)$ no tempo n , e $*$ denota a convolução linear.

O ajuste dos pesos é feito pelo método do “Steepest Descent”, Widrow et al. (1985), definido por

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla \xi \quad (15)$$

Onde μ representa um fator de convergência ou passo, ∇ representa a função gradiente. O erro médio quadrático $\xi(n)$ é

$$\xi(n) = E[e^2(n)] \quad (16)$$

Onde $E[.]$ denota o valor esperado.

Utilizando o erro instantâneo como uma aproximação do $\xi(n)$ [Widrow et al. (1985)],

$$\xi(n) = E[e^2(n)] \approx e^2(n) \quad (17)$$

Então, o gradiente apresentado na Eq. (15) pode ser dado por

$$\nabla \xi(n) = -2c(n)^* x(n)e(n) = fx(n)e(n) \quad (18)$$

Onde $fx(n)$ é a referência $x(n)$ filtrada por $\hat{C}(z)$

E finalmente o ajuste dos pesos para o “Filtered-X LMS” torna-se

$$w(n+1) = w(n) + \mu fx(n)e(n) \quad (19)$$

A Eq. (19) representa o algoritmo “Filtered-X LMS” ou algoritmo de gradiente estocástico. Pode-se provar que a estimativa do gradiente é não polarizada, Kuo et al. (1996). A estabilidade, tempo de convergência e flutuação do processo adaptativo do “Filtered-X LMS” são governados pelo passo e a potência do sinal de referência, o máximo passo μ é inversamente proporcional à ordem L do filtro e da potência do sinal de referência filtrada $fx(n)$. Uma técnica para otimizar a velocidade de convergência mantendo um bom desempenho no estado estacionário é torná-lo independente da potência do sinal de referência; este método é chamado de “Normalized Filterd-X LMS algorithm” ou “FX NLMS”, onde o ajuste dos pesos é dado por

$$\mu(n) = \frac{\mu}{fx^T(n)fx(n)} \quad (20)$$

Então para o “Filtered-X NLMS” o ajuste dos pesos torna-se

$$w(n+1) = w(n) + \mu(n)fx(n)e(n) \quad (21)$$

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Dois experimentos foram realizados, o primeiro para verificar a validade do sistema de medida de impedância e o segundo para verificar qual a influência do controlador Filtered-X LMS nas impedâncias de um duto.

4.1 Impedâncias passivas de um duto reto

Para a verificação do esquema de medida das impedância utilizou-se um duto reto cujo esquema experimental está apresentado na Figura 2.

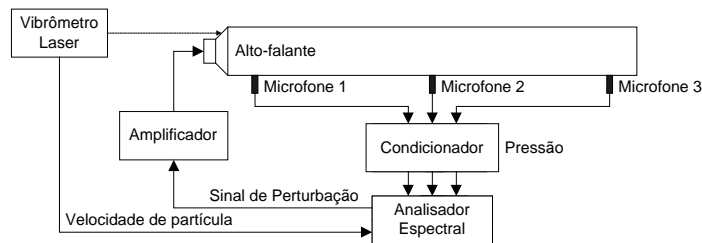


Figura 2 : Montagem experimental para medição das impedância do duto reto

Foi utilizado um duto reto de PVC com comprimento $L = 3,06$ metros e diâmetro interno $d = 0,145$ metros, aberto e não flangeado na extremidade $x = L$ e com um alto-falante 6 polegadas fixado na extremidade $x = 0$.

A pressão $p(x,\omega)$ foi medida utilizando 3 microfones omnidirecional (Model Shop modelo TMS 130A10 com sensibilidade nominal de 25 mV/Pa) fixados perpendicularmente ao duto nas posições 0,035 metros, 0,99 metros e 2,90 metros do alto-falante. A velocidade de partícula $u(0,\omega)$ foi medida através de um vibrômetro laser Doppler (Bruel & Kjaer modelo 8323 com sensibilidade 1 V/m/s) medindo a velocidade do cone do alto-falante.

O processamento da impedância específica $z(x,\omega)$ foi feita até 1000 Hz com discretização de 0,5 Hz e a expressão para a impedância específica teórica utilizada foi

$$z(x,\omega) = \frac{p(x,\omega)}{u(0,\omega)} = \rho_0 c \frac{Ae^{ik(L-x)} + Be^{-ik(L-x)}}{Ae^{iL} - Be^{-iL}} \quad (22)$$

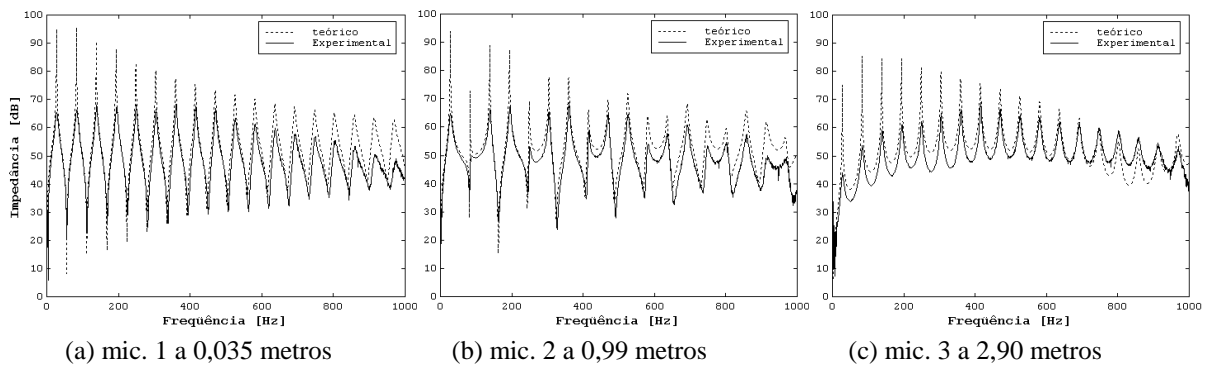


Figura 3 – Impedâncias específicas nos microfones relativas à velocidade de partícula no alto-falante. Amplitudes em decibéis com referência 1 Pa/(ms⁻¹).

Observando a Figura 3, nota-se que o método utilizado para a medição da impedância apresentou uma excelente congruência das frequências naturais das impedâncias experimentais com as impedâncias teóricas. As principais divergências entre as amplitudes de ambas ocorre principalmente devido à presença de amortecimento que, no modelo teórico, não é levado em consideração. Outro problema visível ocorre acima de 800 Hz, este problema é devido principalmente aos níveis de ruído na velocidade de partícula medida pelo vibrômetro.

4.2 Medição das Impedâncias com o Controlador Atuando

Para a identificação do duto utilizou-se o esquema experimental apresentado na Figura 4. Foi utilizado um duto de PVC com comprimento $L = 3,15$ metros e diâmetro interno $d = 0,145$ metros, aberto e não flangeado na extremidade $x = L$ e com um alto-falante de perturbação de 6 polegadas fixado na extremidade $x = 0$ e um alto-falante de 6 polegadas posicionado perpendicularmente ao duto a uma distância de 0,74 metros em relação ao alto-falante de perturbação e a 0,22 metros em relação ao centro do duto (formando assim uma configuração denominada “T”).

A pressão $p(x,\omega)$ ou resposta da planta foi medida utilizando 6 microfones fixados perpendicularmente ao duto nas posições 0,03 metros, 0,28 metros, 1,10 metros, 2,12 metros, 2,55 metros e 3,09 metros do alto-falante de perturbação.

As entradas do sistema foram consideradas como sendo os alto-falantes de perturbação e de controle. Para a identificação do duto na configuração “T”, as FRFs foram adquiridas considerando (sinal do microfone)/(sinal de excitação), isto é, foram consideradas na planta identificada todas as funções de transferência dos amplificadores, sensores, condicionadores e atuadores presentes. Foram utilizados como entradas os dois alto-falantes e como saída os microfones 2, 3, 4 e 5.

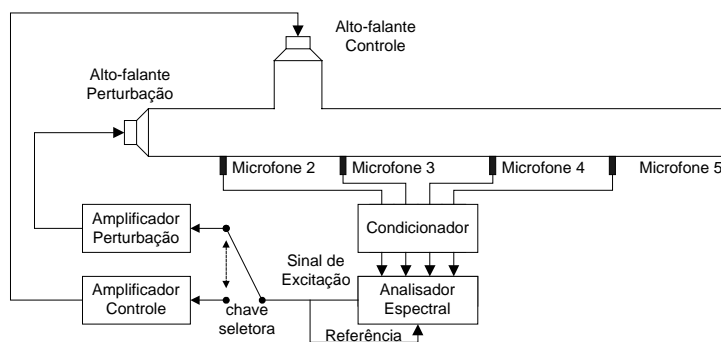


Figura 4 – Montagem experimental utilizado na identificação do duto T

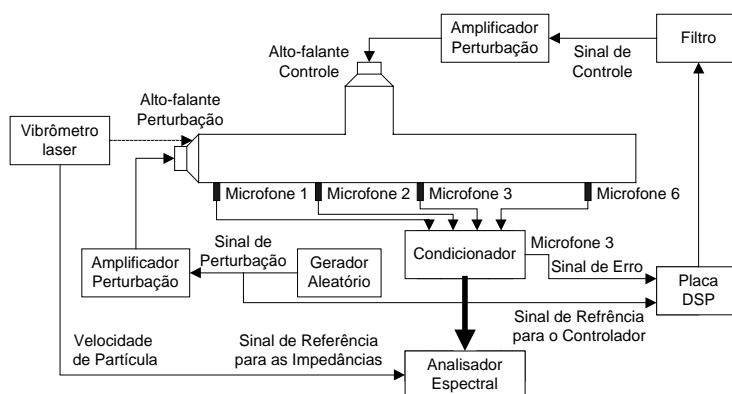


Figura 5 – Montagem experimental utilizada para medir as impedância enquanto o controlador esta ligado.

Para a geração das respostas do sistema foi excitada uma entrada de cada vez enquanto a outra estava desligada, sendo então medidas as saídas nos microfones. A excitação do sistema foi um sinal pseudo-aleatório com frequência entre 0 e 500 Hz com uma discretização de 0.5 Hz. Os resultados são apresentados na Figura 6, que mostra as FRFs medidas e as FRFs ajustadas utilizando o modelo identificado pelo algoritmo ERA, Juang et al. (1986), para identificar a planta $\hat{C}(z)$ apresentada na Figura 1.

Observando as Figura 6 de (a) a (h) observa-se a boa estimativa da planta acústica do duto. Apenas acima de 400 Hz as FRFs experimentais apresentaram problemas devido a ruídos no sinal de pressão.

Para a medição das impedâncias do duto com o controlador ligado utilizou-se do esquema apresentado na Figura 5. O sinal de perturbação foi pseudo-aleatório com frequência entre 0 e 200 Hz e foram medidos as impedâncias com e sem controle. Utilizou-se para o controlador “Filtered-X LMS” um passo $\mu = 0.05$ e o número de pesos $L = 32$. Para evitar problemas com a discretização da placa de controle digital foi utilizado um filtro com frequência de corte em 500 Hz posicionado entre a saída do conversor D/A da placa de controle e o amplificador de controle. Os resultados experimentais da medição das impedâncias com e sem controle estão apresentados na Figura 7 (a) a (d).

A medida de potência injetada pode ser observada na Figura 8. A potência injetada, $P_{in} = 0.5\Re\{pu^*\}$, pode ser obtida através da impedância acústica específica, $z = p/u$, desta forma tem-se a potência injetada em função da impedância e da velocidade de partícula, $P_{in} = 0.5\Re\{z\}|u|^2$.

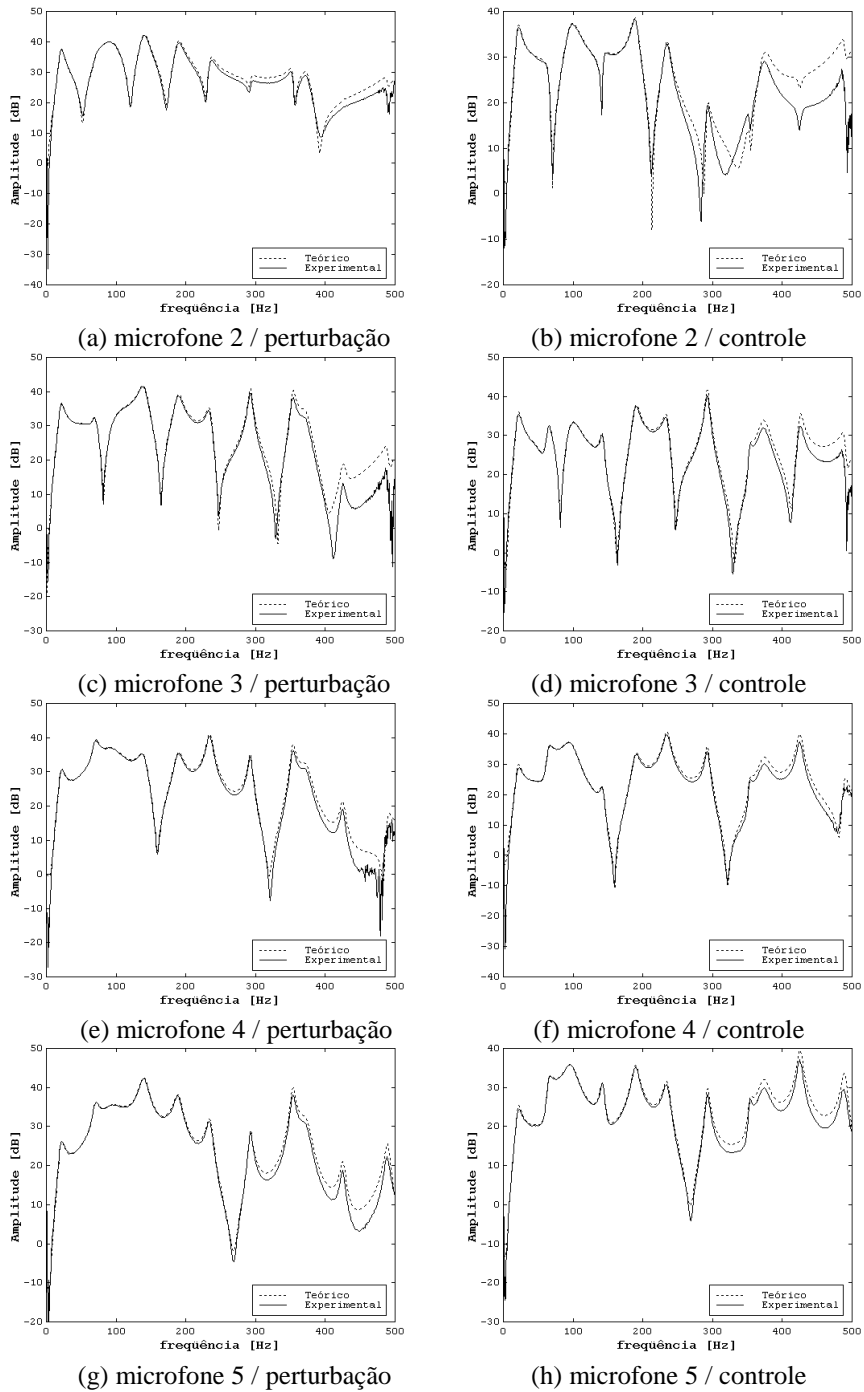


Figura 6 – Comparação espectral entre a planta estimada e a planta real. Amplitudes em decibéis com referência 1 Pa/V.

Observando a Figura 7 (a) observa-se que ocorreu uma alteração significativa quando o controlador está atuando; observando a parte real e a parte imaginária, nota-se que houve uma suavização na impedância pontual (“driving point”), este mesmo fato também pode ser notado na Figura 7 (b). Na Figura 7 (c) (ponto escolhido para controle) observa-se claramente a redução da impedância entre a velocidade no alto-falante de perturbação e o microfone 3 já que ocorre uma atenuação significativa da pressão atuante neste ponto. Este fato também pode ser observado na Figura 7 (d). Isto ocorre porque o comprimento de onda para 250 Hz (maior frequência utilizada) é muito maior que o comprimento do duto, significando que uma

redução no microfone 3 acarreta também uma redução no microfone 6.

Quanto à potência injetada, observada na Figura 8, nota-se que ocorre uma atenuação em algumas faixas de frequência, mas ocorre também um aumento em outras faixas. Desta forma observando a potência injetada no microfone 1, o resultado é inconclusivo quanto à influência do controlador na potência que o alto-falante de perturbação injeta no sistema.

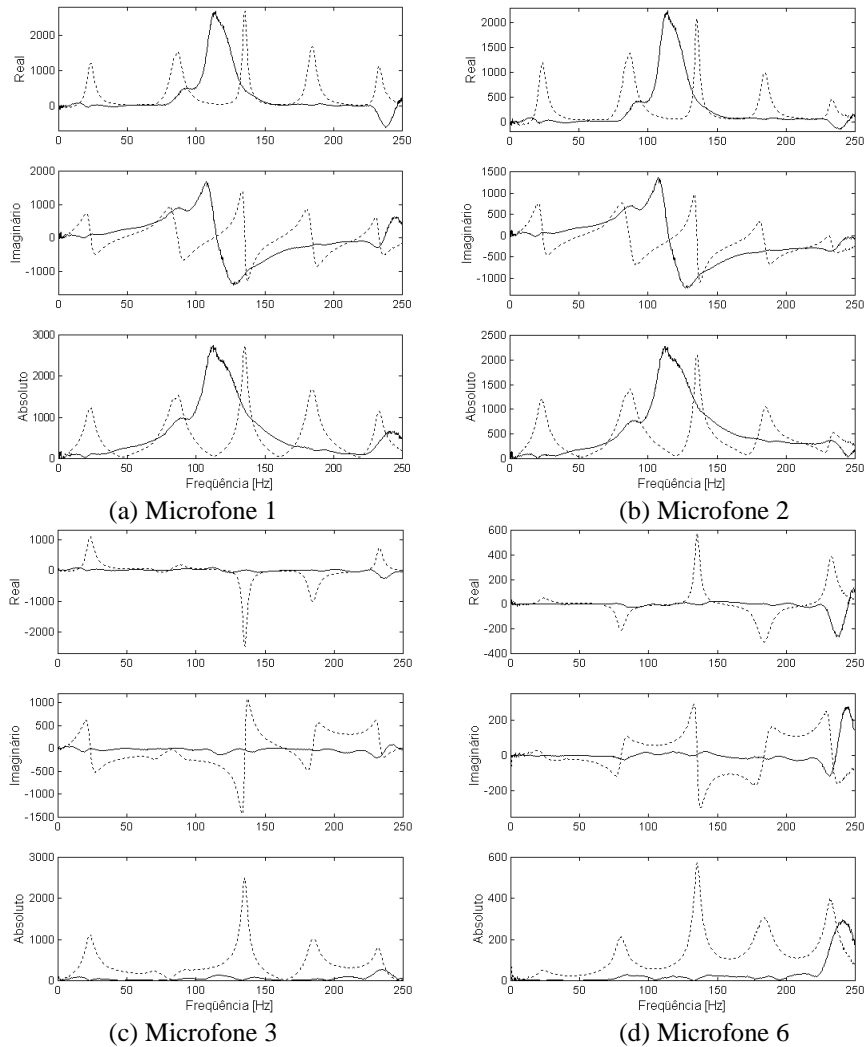


Figura 7 – Impedância específica sem controle (linha tracejada) e impedância específica com controle (linha cheia). Valores em $\text{Pa}/(\text{ms}^{-1})$.

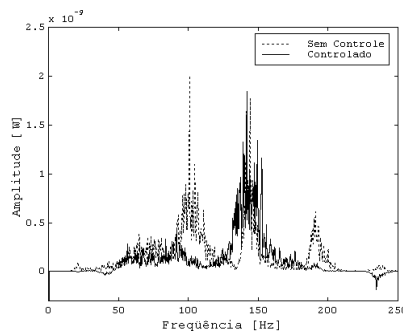


Figura 8 – Medida de potência injetada vista pelo microfone 1

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi descrita a utilização de um vibrômetro laser Doppler para medir a impedância acústica em um duto. Os resultados apresentam boa comparação com os valores teóricos. Observou-se que o controle ativo com o algoritmo “Filtered-X LMS” altera significativamente as impedâncias. Em pontos espacialmente anteriores aos de controle ocorre uma suavização e em pontos de controle e pontos posteriores ocorre uma diminuição global da impedância, devido à diminuição nos níveis de pressão sonora. Entretanto, como as alterações nas impedâncias e na energia injetada pela fonte de perturbação causadas pelo controlador não puderam ser totalmente explicadas, o assunto ainda necessita ser investigado em profundidade.

REFERÊNCIAS

- Juang, J.N., Pappa, R.S., 1986, Effects of Noise on Modal Parameters Identification by the Eigensystem Realization Algorithm, Journal of Guidance Control and Dynamics, vol. 9, n. 3, pp. 294-303.
- Hansen, C.H., Snyder, S.D., 1997, Active Control of Noise and Vibration, E&FN Spon, London.
- Haykin, S., 1996, Adaptive Filter Theory, 3^a Ed., Prentice Hall, New York.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., 1982, Fundamentals of Acoustics, J. Wiley, New York.
- Kuo, S.M., Morgan, D.R., 1996, Active Noise Control Systems – Algorithms and DSP Implementations, J. Wiley, New York.
- Snyder, S.D., Hansen, C.H. 1989, Active Noise Control in Ducts : Some Physical Insights, Journal of the Acoustic Society of America, vol. 86, n. 1, pp. 184-194.
- Widrow, B., Stearns, S.D., 1985, Adaptive Signal Processing, New York, Prentice Hall.

INFLUENCE OF THE FILTERED-X LMS CONTROLLER IN THE IMPEDANCES OF A DUCT

Abstract. *In the last decades, the active control of noise is becoming more widely investigated. Several applications have appeared, such as the active control of noise in ducts. The control methods are getting more and more varied and sophisticated. Nowadays, one of the most used is the “Filtered-X LMS”. This work investigates the behavior of impedance in a duct observed by the disturbance source when the “Filtered-X LMS” controller is working. The experimental set-up has been implemented using two loudspeakers, one as disturbing source and the other as the control source, placed transversely to the duct. The impedance measures obtained from the quotient between pressure and volume velocity. The pressure was measured using several microphones placed along the duct, while the volume velocity was measured using a laser Doppler vibrometer to measure the velocity of the loudspeaker cone. It was observed that the controller significantly changes the measured impedances at points located upstream relative to the error microphone there is a smoothing of the impedance curves while at located downstream and at the error microphone the impedances are globally reduced.*

Key words: *Filtered-X LMS Controller, Acoustic impedance measurement in ducts, Active Noise Control in ducts.*