

ESTIMATIVA DA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA DE UM SISTEMA MISO (MÚLTIPLAS ENTRADAS/UMA SAÍDA) VIA FILTRAGEM ADAPTATIVA PARA APLICAÇÃO EM ACÚSTICA PREVISIONAL

Maria Alzira de Araújo Nunes

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, 2160 Bl.1M – Campus Sta Mônica - Uberlândia-MG – 38400-902
maanunes@mecanica.ufu.br

Marcus Antônio Viana Duarte

mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: Nas últimas duas décadas, os estudos sobre os efeitos do ruído na audição e conseqüente melhoria da qualidade de vida do ser humano ganharam grande impulso. Uma das grandes vertentes destes estudos, trata de analisar a influência do ruído industrial na qualidade do ambiente exterior onde as pessoas circulam ou permanecem. Uma vez que as fontes sonoras presentes em uma indústria não podem ser desligadas devido ao processo contínuo de produção e ainda há presença de fontes coerentes neste ambiente, o sistema ‘fontes sonoras - receptor externo’ é considerado um sistema MISO (múltiplas entradas e uma saída). Propõe-se então neste trabalho uma metodologia que consiste na determinação da Função Transferência (FT) entre a fonte sonora de interesse (localizada dentro da indústria) e o ponto receptor, utilizando filtro adaptativo LMS (Least Mean Square) juntamente com uma fonte sonora de referência (gerador de sine sweep). Desta maneira, após estimada a FT e o sinal (pressão sonora) obtido próximo à fonte sonora que se quer quantificar, é possível então estimar o nível de ruído proveniente desta fonte no ponto receptor localizado externamente à planta industrial. Simulações numéricas comprovaram os excelentes resultados obtidos. No entanto, a capacidade de filtragem do filtro (LMS) é comprometida à medida que o nível de energia da fonte de referência é reduzido se comparado com a energia gerada pelas outras fontes no ponto receptor.

Palavras-chave: acústica, sistema MISO, filtragem adaptativa, LMS

1. INTRODUÇÃO

A exposição da população ao Ruído Ambiente, particularmente nas zonas urbanas, tem merecido uma atenção crescente por parte da comunidade. Uma das grandes preocupações se trata de analisar a influência do ruído industrial, na qualidade do ambiente exterior onde as pessoas circulam ou permanecem, sendo este tipo de ruído uma das maiores causas de reclamações das comunidades no órgão competente de sua cidade (Handley, 1995).

Com o acelerado crescimento das cidades, está ocorrendo com frequência a invasão de residências nas áreas industriais. No entanto, as fábricas que antes eram localizadas afastadas dos grandes centros, agora são cercadas por domicílios, escolas, comércio e até hospitais. Estas fábricas, geralmente, são antigas, e com processos de fabricação ruidosos, ou seja, não possuem nenhum tipo de tratamento acústico, pois até então, a única preocupação que o engenheiro de segurança do trabalho devia ter era com o ruído que atinge os trabalhadores desta.

Atualmente, problemas com ruído no interior e no exterior da fábrica têm sido uma constante. No entanto, procura-se direcionar este trabalho para ruído com propagação externa à indústria.

O principal desafio encontrado no controle de ruído ambiental consiste em identificar quais fontes de potência sonora deverão ser tratadas para que os níveis de ruído medidos em pontos de controle atendam aos valores exigidos pela legislação vigente. O grande problema a ser contornado reside no fato de que uma planta industrial de porte médio é composta por milhares de fontes de ruído que contribuem para os níveis de ruído total medidos na comunidade circunvizinha. Este tipo de problema é caracterizado como propagação de ruído externo.

A predição de níveis de pressão sonora em áreas externas adjacentes a fontes de ruído requer a análise da propagação de som ao ar livre. Esta propagação é afetada pela atenuação ao longo do caminho de transmissão e é estimada através de correções aditivas para divergência esférica, absorção no ar, reflexões, efeito da vegetação, efeito da topografia do solo, efeito de barreiras e espalhamento nas próprias instalações. A propagação externa também é afetada por variações nas condições atmosféricas tais como: umidade relativa do ar e temperatura (Barron, 2003).

Em engenharia de controle de ruído é importante estar hábil a identificar diferentes fontes sonoras e determinar suas contribuições no ponto de controle. Quando se diz identificação da fonte de ruído, entende-se que serão determinadas a localização e o Nível de Potência Sonora (NWS) da mesma, além de estimar as propriedades acústicas, tais como intensidade e frequências que compõe o espectro da fonte.

Em geral, são características de uma planta industrial:

- Existência de inúmeras fontes sonoras, as quais contribuem para o NPS total medido em um ponto receptor externo (sistema MISO);
- As fontes não podem ser desligadas devido ao processo de produção contínuo;
- Presença de fontes coerentes;

O caminho de transmissão sonoro entre as fontes e o ponto receptor externo é complexo, ou seja, com presença de reflexões de raios acústicos.

Tendo em vista as características citadas, este trabalho tem como objetivo a determinação (estimativa) da Função Transferência entre a fonte sonora que se quer quantificar e o ponto receptor localizado externamente à planta industrial.

Para estimativa desta Função Transferência, utiliza-se um filtro adaptativo LMS (*Least Mean Square*) e ainda uma fonte de referência, a qual gera um sinal do tipo varredura senoidal (*sine sweep*). A utilização da varredura senoidal se justifica pelo fato deste sinal não estar correlacionado com nenhuma fonte presente no sistema e por varrer toda a faixa de frequência de interesse.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho é constituída de simulação numérico-computacional, a qual tem o propósito de modelar a propagação sonora em campo livre. E então, avaliar o desempenho da técnica da filtragem adaptativa a fim de obter a função transferência entre a fonte sonora de interesse e o ponto receptor.

Todas as rotinas utilizadas na simulação são programadas em ambiente Matlab®.

O modelo numérico é constituído de fontes sonoras propagando em campo livre, onde se leva em consideração apenas os efeitos da divergência acústica (atenuação devido à distância) e da absorção atmosférica. Dos princípios da acústica básica, pode-se então estimar o ruído que atinge um ponto receptor devido à contribuição das fontes especificadas.

O modelo numérico é capaz de fornecer para o modelo descrito:

- A função transferência teórica entre cada ponto emissor (fonte de ruído) e o ponto receptor, sendo que nesta equação, a entrada do sistema é o ruído estimado próxima à fonte e a saída é o sinal estimado no ponto receptor devido à fonte da entrada do sistema.
- Os sinais estimados a um metro de distância de cada fonte.
- Os sinais estimados no ponto receptor devido a contribuição de cada fonte.
- O sinal total no ponto receptor, o qual é a contribuição de todas as fontes neste ponto.

Com os sinais citados acima, é possível realizar comparações entre estes e os sinais estimados com a metodologia proposta no trabalho (filtragem adaptativa), ou seja, estimativa da função

transferência entre uma fonte de interesse e o ponto receptor, a partir de sinais medidos no ponto (receptor) com a contribuição de todas as fontes.

Para estimar a função transferência de acordo com o objetivo do trabalho, ou seja, utilizando filtragem adaptativa, uma fonte de referência (gerador de sinal do tipo *sine sweep*) é colocada próxima à fonte de interesse, e mede-se no ponto receptor o ruído proveniente de todas as fontes presentes no ambiente inclusive o *sine sweep*. Assim, utilizando uma técnica de filtragem adaptativa, se consegue retirar do sinal obtido no ponto receptor somente o *sine sweep*.

A fonte de referência gera um sinal do tipo varredura senoidal (*sine sweep*), o qual é caracterizado por sua variação de frequência ao longo do tempo, por isso a utilização de um filtro adaptativo, visto que este tem a capacidade de se adaptar às variações sofridas pelo sinal ao longo do tempo.

Finalmente, com os dois sinais: *Sine Sweep* estimado próximo ao seu gerador (à 1 metro deste), e o *sine sweep* obtido no ponto receptor (estimado através de filtragem adaptativa), pode-se calcular a função transferência entre os dois pontos (emissor e receptor).

Para aplicação em acústica previsional, utiliza-se a função transferência estimada por meio do filtro, tendo então, condição de quantificar a contribuição da fonte no ponto receptor, desde que esta esteja localizada nas proximidades do mesmo ponto emissor (gerador de sweep) usado na estimativa da função transferência.

O filtro adaptativo utilizado neste trabalho utiliza o algoritmo LMS – *Least Mean Square* para obtenção da estimativa ótima a ser estimado pelo filtro. O diagrama da técnica de filtragem adaptativa utilizada neste trabalho é mostrado na Fig. (1) (Widrow and Stearns, 1985).

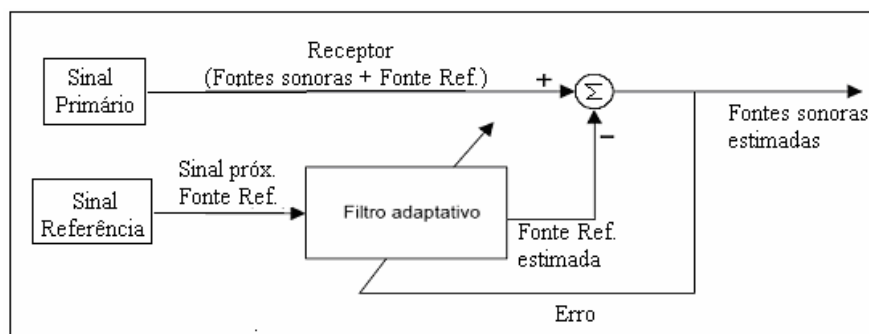


Figura 1 - Esquema do filtro adaptativo utilizado neste trabalho.

Analisando a Fig. (1), temos que: o sinal primário é constituído do sinal obtido no ponto receptor (um ponto pré-determinado) com a contribuição sonora de todas as fontes do sistema (ou da área em estudo), inclusive a contribuição sonora de uma fonte de referência, a qual será adicionada ao sistema e posicionada próxima à fonte de interesse (que se quer identificar). O sinal de referência é o sinal obtido próximo (aproximadamente a 1 m) à fonte de referência, ou seja, o sinal possui contribuição sonora apenas desta fonte.

No entanto, antes de seguir com a simulação de propagação sonora em campo livre, primeiramente é realizada uma análise de sensibilidade, onde o objetivo desta análise é avaliar a capacidade de filtragem do filtro bem como a qualidade do sinal filtrado, em função das amplitudes dos sinais que compõem o sinal de referência juntamente com variações na amplitude do sinal de entrada do filtro.

Para a análise de sensibilidade utilizaremos as seguintes notações: R_i é o sinal primário do filtro obtido no ponto receptor, o qual é composto pela soma de dois sinais: R e s , sendo R o sinal de uma fonte arbitrária a qual faz parte do modelo e s um sinal de varredura senoidal; S é o sinal de referência, o qual é obtido próximo à fonte de referência, e está correlacionado com s , sendo este um sinal de varredura senoidal; $\hat{y} = \hat{s}$ é o sinal de saída do filtro, o qual é uma estimativa de s , e $\hat{R}$ é o sinal filtrado, ou seja, uma estimativa somente de R .

Os parâmetros utilizados no algoritmo LMS foram definidos após uma otimização randômica a partir de valores iniciais que pertencem às faixas especificadas na teoria sobre filtro LMS.

Para o cálculo da Função Transferência estimada (FT entre o *sweep* estimado com o filtro (ponto receptor) e o *sweep* medido próximo ao gerador (ponto emissor)) e da Função Transferência teórica (FT entre o *sweep* teórico (ponto receptor) e o *sweep* medido próximo ao gerador (ponto emissor)), a qual é utilizada para fins de comparação, as Eqs. (1) e (2) são utilizadas.

$$FT_{est} = 10 \log_{10} (\bar{x}_{sweep_est}^2) - 10 \log_{10} (\bar{x}_{Sweep_prox}^2) \quad (1)$$

$$FT_{teor} = 10 \log_{10} (\bar{x}_{sweep_teor}^2) - 10 \log_{10} (\bar{x}_{Sweep_prox}^2) \quad (2)$$

onde FT_{est} é a Função Transferência estimada, $\bar{x}_{sweep_est}^2$ é a média exponencial da entrada do sistema, ou seja, o *sweep* estimado no ponto receptor com o filtro adaptativo, $\bar{x}_{Sweep_prox}^2$ é a média exponencial (para um tempo de resposta igual a 125×10^{-3} s) da saída do sistema, ou seja, do *sweep* estimado próximo ao gerador de *sine sweep*, FT_{teor} é a Função Transferência teórica e $\bar{x}_{sweep_teor}^2$ é a média exponencial (para um tempo de resposta de 125×10^{-3} s) do *sweep* teórico (obtido numericamente) no ponto receptor.

A média exponencial, $\bar{x}^2$, contida nas Eq. (1) e (2) é dada pela Eq. (3):

$$\bar{x}_i^2 = x_{i-1}^2 + (x_i^2 - x_{i-1}^2) / k \quad (3)$$

onde $\bar{x}_i^2$ é o *i*-ésimo termo do vetor $\bar{x}^2$ e *k* é dado pela Eq. (4):

$$k = f_{aquis} T + 1 \quad (4)$$

onde f_{aquis} é a frequência de aquisição em Hz e *T* é o tempo de integração, o qual neste trabalho é igual a 125×10^{-3} s, o que corresponde a um tempo de integração rápido (*fast*), permitindo então um esquecimento das ocorrências passadas no sinal analisado.

O erro entre a Função Transferência teórica e a Função Transferência estimada é dado pela Eq. (5).

$$Erro_{FT} = FT_{teor} - FT_{est} \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para simulação da análise de sensibilidade o *sine sweep* utilizado tem como características: duração de 10 segundos na faixa de frequência 50 Hz a 2.000 Hz.

Os melhores valores estimados dos parâmetros do filtro para utilização com o *sine sweep* especificado acima foram: número de pesos do filtro: $L=20$; μ (razão de convergência) $=8 \times 10^{-3}$, onde $0 < \mu < 1$; α (fator de esquecimento, ou *forgetting factor*) $= 0,01$, onde $0 < \alpha < 1$.

Na Fig. (2) está mostrado o espectrograma (Transformada Curta de Fourier, ou *Short Fourier Transform* - SFT) do *sine sweep* utilizado na análise de sensibilidade (sinal *s*). Os espectrogramas exibidos neste trabalho são estimados através da função *spectgram* do Matlab®.

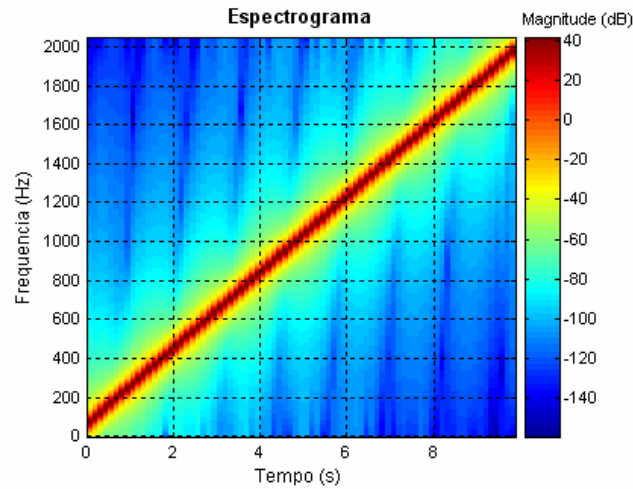


Figura 2 - Espectrograma do sinal s.

Para esta análise de sensibilidade simularam-se cinco configurações do sinal primário em função de nove configurações do sinal de referência do filtro. O resultado obtido está mostrado na Fig. (3).

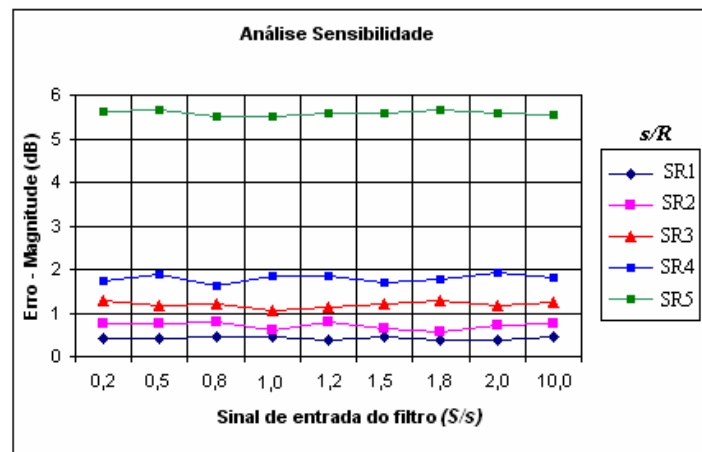


Figura 3 - Resultado da análise de sensibilidade.

Na Fig. (3) a legenda de s/R corresponde à amplitude, em porcentagem, de s em relação a R , por exemplo: na configuração SR1, a amplitude de s é 40% maior que a amplitude de R , ou seja, $s=1,4R$, na configuração SR2 temos que $s=R$, ou seja, a amplitude de s é igual a amplitude de R e finalmente na configuração SR3 temos que $s=0,7R$, ou seja, a amplitude de s é 30% menor que a amplitude de R .

Já o eixo horizontal (abscissas), (S/s) , da Fig. (3) corresponde à amplitude, também em porcentagem, de S relativa à s . Assim temos que, para a primeira configuração da coluna, $S=0,2 s$, a amplitude de S é 80% menor que a amplitude de s . Já para a quinta configuração, $S=1,2 s$, a amplitude de S é 20% maior que a amplitude de s .

Analisando a Fig. (3), conclui-se que quanto maior a amplitude (ou energia) de s em relação a R , no sinal primário (R_i), menor será o erro obtido entre o sinal estimado com o filtro $\hat{s}$ e o sinal teórico s . Já a variação da amplitude do sinal S (sinal de referência) não fornece variação significativa nos resultados obtidos com o filtro (Huertas and Antelis, 2005).

Adaptando estas conclusões para o objetivo do trabalho proposto tem-se que quanto maior o nível de pressão sonora (NPS) medido no ponto receptor devido somente à contribuição do gerador de *sine sweep*, em relação ao nível de pressão sonora medido neste mesmo ponto (ou seja, nível

devido às fontes presentes sem influência do gerador de varredura senoidal), melhor será o resultado obtido com o filtro, ou seja, mais precisa será a função transferência estimada entre o receptor e o emissor.

A seguir são mostrados os resultados obtidos com a simulação numérica de um modelo com três fontes sonoras, onde o modelo representa a propagação sonora de fontes de ruído em campo livre. O modelo utilizado na simulação pode ser observado na Fig. (4).

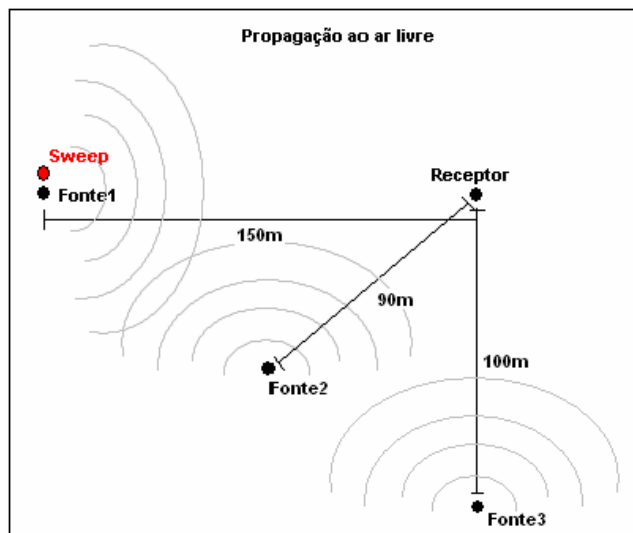


Figura 4 - Modelo utilizado na simulação com três fontes sonoras.

O objetivo desta simulação é estimar o nível de ruído que chega ao ponto receptor devido à Fonte1, daí a necessidade de se localizar a fonte geradora de *sine sweep* próxima a esta fonte.

Na Tab. (1) estão relacionadas as componentes em frequência presentes nos sinais das fontes da Fig. (4).

Tabela 1 – Frequências presentes nos sinais das fontes da simulação.

Fonte	Frequências (Hz)
1	300; 500; 700; 1000; 1300; 1700; 2000.
2	200; 400; 500; 1000; 1200; 1850.
3	125; 200; 500; 1300; 1550; 1800.

De posse dos sinais emitidos pelas fontes no ponto receptor, inclusive o sinal emitido pela fonte de referência (gerador de sine sweep), utiliza-se o diagrama mostrado na Fig. (1) para obtenção do sweep que chega no ponto receptor sem a influência das fontes adjacentes. Neste diagrama, tem-se como entrada o sinal primário, o qual está mostrado na Fig. (5-a), e o sinal de referência, mostrado na Fig. (5-c). O sinal de interesse é uma estimativa do sweep que chega até o ponto receptor.

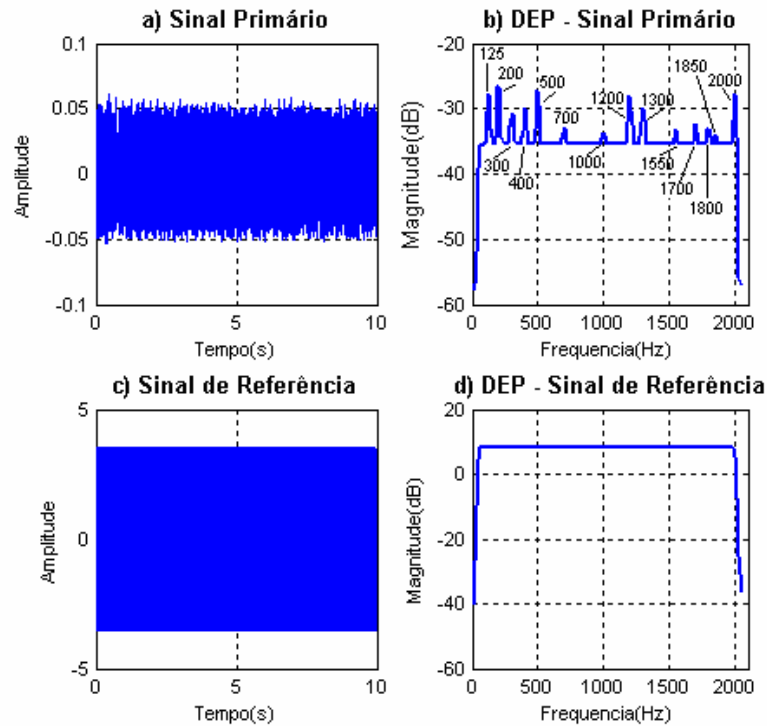


Figura 5 - Sinais de entrada do algoritmo LMS.

Como observado na Fig. (5-d), o gerador de *sweep*, o qual está colocado próximo à Fonte1, gera um sinal (*sine sweep* linear) na faixa de frequência 50 Hz a 2000 Hz em 10 segundos.

Após utilização do filtro LMS (diagrama da Fig. (1)), o resultado obtido, ou seja, a estimativa do *sweep*, o qual chega até o ponto receptor, está mostrado na Fig. (6-a) no domínio da frequência para melhor avaliação do resultado do filtro. Na Fig. (6-b) está mostrado o erro absoluto (*sweep* teórico menos *sweep* estimado) entre o *sine sweep* estimado e o *sine sweep* teórico, ambos no ponto receptor e na faixa de frequência analisada (50 a 2000 Hz).

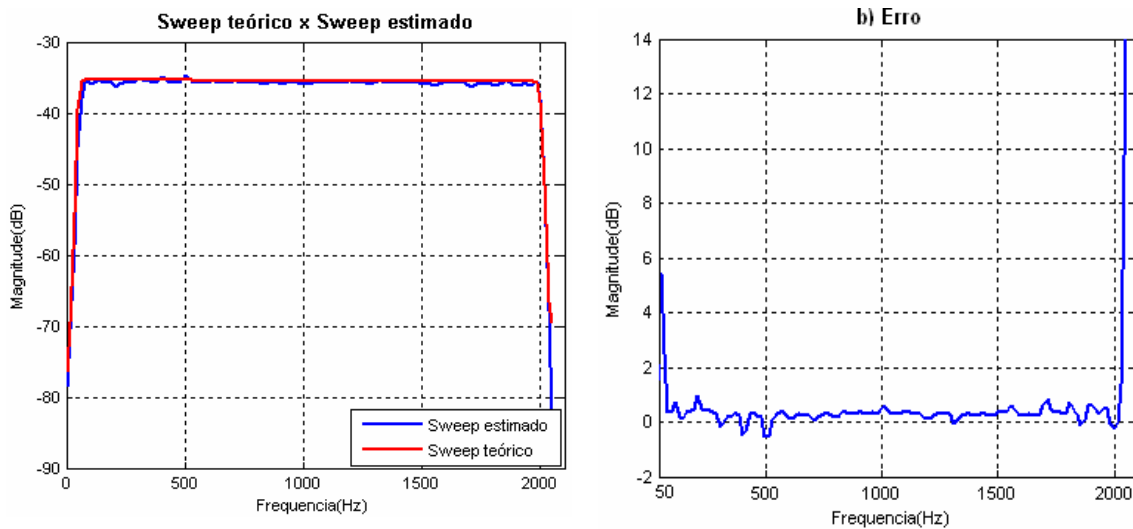


Figura 6: a) Comparação entre o *sine sweep* estimado e o *sine sweep* teórico no receptor. b) Erro entre o *sine sweep* estimado e o *sine sweep* teórico.

Analisando a Fig. (6-a), pode-se dizer que o desempenho do filtro para este modelo é satisfatório.

Observa-se ainda na Fig. (6-b) um erro elevado nas baixas frequências (até 60 Hz), isto se deve ao período de convergência do filtro. No entanto, pode-se afirmar que o erro não atingiu valores maiores que 1 dB dentro da faixa de frequência 60 Hz - 2000 Hz. Este baixo valor de erro (na faixa de frequência 60 Hz - 2000 Hz) se deve à grande contribuição de energia que o gerador de varredura emite no ponto receptor, fazendo com que o filtro possa ter um bom desempenho, como já concluído na análise de sensibilidade. As contribuições de energias no ponto receptor devido às fontes de ruído são mostradas na Fig. (7).

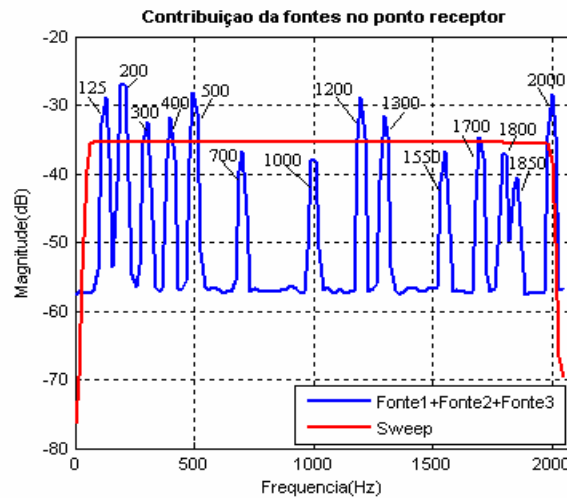


Figura 7 - Contribuição das fontes no ponto receptor.

Para finalizar os resultados desta simulação, na Fig. (8-a) é mostrada a densidade espectral de potência da Função Transferência estimada, juntamente com a Função Transferência teórica, entre o ponto de localização da Fonte1 e o ponto receptor. Na Fig.(8-b) é mostrado o erro entre as duas Funções Transferência (FT teórica – FT estimada). Ressalta-se que para o cálculo das Funções de Transferência utilizaram-se as Eq. (1) e (2).

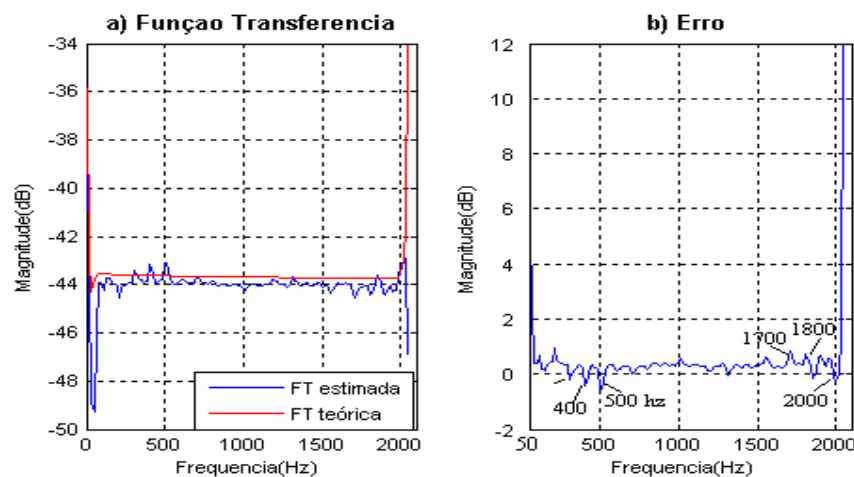


Figura 11 - a) Função transferência teórica e estimada para a simulação. b) Erro entre as funções transferências (FT teórica – FT estimada).

Quanto ao erro entre as duas funções transferências mostradas na Fig. (11), este também não atinge valor maior que 1 dB dentro da faixa de frequência 60 Hz -2000 Hz, o que nos fornece uma ótima estimativa da Função transferência entre o emissor (Fonte 1) e o receptor.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho visa a determinação da Função Transferência de um sistema MISO, ou seja, as entradas são as fontes sonoras de uma indústria e a saída é um ponto de controle localizado na comunidade, utilizando filtro adaptativo e uma fonte de referência (gerador de sinal do tipo varredura senoidal ou *sine sweep*).

As principais conclusões deste trabalho são:

1. Após análise de sensibilidade, utilizando o filtro adaptativo com várias configurações dos sinais primários e de referência, onde se variou os níveis de energia dos sinais que compunham estes, concluiu-se que à medida que diminui a energia do sinal provindo da fonte de referência (um gerador de varredura senoidal) do sinal primário, a capacidade de filtragem do filtro é reduzida, sendo assim, a qualidade do sinal filtrado é comprometida, sendo este sinal inadequado para o uso.
2. A característica do filtro adaptativo descrita no tópico anterior foi observada na simulação realizada com três fontes sonoras irradiando ruído em campo livre.
3. Quanto ao nível de energia do sinal de referência, esta característica não se mostrou significativa, ou seja, para que se obtenha um bom desempenho do filtro, é necessário apenas que o sinal de referência seja correlacionado com o ‘ruído’, ou ‘interferência’, que se quer eliminar no sinal primário, independente do nível de energia presente no sinal de referência.
4. Para utilização do filtro adaptativo, é necessário utilizar os parâmetros (número de pesos do filtro, razão de convergência e fator de esquecimento) que irão fornecer uma boa convergência e uma boa capacidade de filtragem do sistema, por isto a necessidade de otimizar estes parâmetros com uma função objetivo que vise minimizar o erro entre o sinal estimado com o filtro e o sinal teórico. Conclui-se que tais parâmetros é função da velocidade de varredura do *sine sweep* utilizado.
5. Quanto à presença de fontes coerentes no modelo ou no sistema a ser analisado, o resultado obtido com a utilização do filtro possui boa relação sinal ruído (igual a 17 dB), obtendo somente o sinal da fonte de referência que chega no ponto receptor, o qual é o sinal de interesse, visto que o sinal de referência não está correlacionado com nenhuma fonte presente no sistema. Este resultado pode ser observado na simulação realizada

5. AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. Ao CNPq e à FAPEMIG.

6. REFERÊNCIAS

- Barron, R. F., 2003, “Industrial Noise Control and Acoustic”. 1.ed. Marcel Dekker Inc., New York, 534p.
- Handley, J. M., 1995, “Controle de Ruído Industrial”. Revista Acústica e Vibrações. 15.ed.
- Huertas, J. I., Antelis, J. M., 2005, “Characterization of Adaptive Filters Used in the Identification Process of Annoying Noises in Vehicles”. Proceedings of the INTERNOISE 2005 - CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 07-10 august 2005, Rio de Janeiro, Brasil.
- Widrow, B., Stearns, S. D., 1985, “Adaptive Signal Processing”. 1.ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 528p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ESTIMATE OF THE TRANSFER FUNCTION OF A MISO MODEL (MULTIPLE INPUT/SINGLE OUTPUT) USING ADAPTIVE FILTER FOR APPLICATION IN PREVISIONAL ACOUSTIC

Maria Alzira de Araújo Nunes

Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica
João Naves de Ávila Avenue, 2160 Bl. 1M – Campus Sta Mônica - Uberlândia-MG – 38400-902
maanunes@mecanica.ufu.br

Marcus Antônio Viana Duarte

mvduarte@mecanica.ufu.br

Abstract. *In the last twenty years, studies about the effect of the noise in the hearing and in the quality of life of the human being had gotten a great impulse. One of the biggest sources of these studies, aims to analyze the influence of the industrial noise in the quality of the exterior environment where the people circulate or remain. Once the noise sources in an industry cannot be turn off due to the continuous process of production and is very common to have the presence of coherent sources in this environment, the system 'noise sources - external receptor' is considered a MISO model (multiple input and single output). In this work is propose a methodology consisting of the determination of Transfer Function (FT) between the noise source of interest and the receiving point, using adaptive filter LMS (Least Mean Square) and a reference source (generating of sine sweep). In this way, with the FT estimated and the acquired signal (acoustic pressure) next to the noise source, which we want to quantify, it is possible to estimate the level of noise proceeding from this source in the receiving point, which is located externally to the industrial plant. Excellent results were obtained with numerical simulations. However, the capacity of filtering of the filter is compromised when the level of energy of the reference source is reduced if compared with the energy generated for the other sources in the receiving point.*

Keywords. *Acoustic, MISO model, adaptive filter, LMS.*