

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM UMA CABINE DE AUTOMÓVEL

Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima

São Paulo

2008

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CONTROLE ATIVO DE RUÍDO EM UMA CABINE DE AUTOMÓVEL

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva Lima

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Lima, Luiz Gustavo Del Bianchi da Silva
Controle ativo de ruído em uma cabine de automóvel / L.G.
D.B.S. Lima. – São Paulo, 2008.
p. 67

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Veículos automotores 2.Acústica (Sistemas;controle)
3.Conforto veicular 4.Isolamento acústico 4.Processamento de
sinais acústicos I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

*Para minha noiva Bianca e
para meus pais Carlos e Vera.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa, pela orientação no decorrer desse trabalho e pelo auxílio na obtenção de aparelhagem para a execução dos experimentos.

Ao Prof. Dr. Vítor Heloiz Nascimento, pela co-orientação, por ceder espaço físico para testes com a placa de controle ativo de ruído e pelo empréstimo da placa durante a execução desse trabalho.

A toda a família Olivetti, pelo empréstimo do automóvel utilizado.

Ao engenheiro Cristiano Fernandes Lagatta, pela ajuda prestada no desenvolvimento de toda a parte eletrônica do sistema.

A todos os colegas, docentes e funcionários da Escola Politécnica.

RESUMO

O presente trabalho apresenta propostas de sistemas de controle ativo de ruído em cabines automotivas, com o objetivo de reduzir o ruído que atinge o condutor do veículo. Em primeiro lugar, é apresentada a teoria de acústica e controle, para introduzir como funciona a tecnologia em questão. Em seguida, os aspectos teóricos, em conjunto com publicações sobre o assunto, são utilizados como ferramenta para a proposição de soluções iniciais para o problema, se atendo apenas a requisitos técnicos. Um breve estudo sobre a viabilidade dessas soluções é feito na sequência, levando à escolha de soluções finais, passíveis de serem implementadas em um veículo para a realização de testes de campo. São então conduzidos os testes e é verificada a eficácia desses sistemas, medida pela capacidade de atenuação (em dB) dos mesmos para determinados valores de frequência.

ABSTRACT

This paper presents proposals of active noise control systems on automobile cabins, aiming the reduction of the noise heard by the driver. In first place, is presented the basic theory of acoustics and control, to introduce how this technology works. After that, these theoretic aspects, along with articles and books about the subject, are used as a tool to the proposal of initial solutions for the problem, taking into account only technical requirements. A brief study about the viability of these solutions is then developed, taking to the choice of final solutions, capable of being implemented in a vehicle for the realization of field tests. Finally, the tests are conducted and the efficacy of these systems is verified, measured by their attenuation capacity (in dB) for a given value of frequency.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Conceitos básicos de acústica	13
2.1.1 O fenômeno do som e a propagação sonora	13
2.1.2 O nível de pressão sonora	14
2.1.3 A equação de onda tridimensional e o princípio da superposição	15
2.2 Fundamentos do controle ativo de ruído	17
2.2.1 Histórico	17
2.2.2 Estratégias de controle: <i>feedback</i> e <i>feedforward</i>	18
2.2.2.1 Sistemas de controle <i>feedback</i>	19
2.2.2.2 Sistemas de controle <i>feedforward</i>	20
2.3 Componentes do sistema <i>feedforward</i>	21
2.3.1 Interface analógica-digital	21
2.3.1.1 Conversores AD e DA	22
2.3.1.2 Circuitos “sample and hold”	23
2.3.1.3 Filtros anti-aliasing	23
2.3.1.4 Filtros de reconstrução	24
2.3.2 Filtro digital	24
2.3.3 Algoritmo adaptativo	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 Escolha de soluções iniciais para o caso veicular	30
3.1.1 Filtros (FIR ou IIR)	30
3.1.2 Número e disposição dos alto-falantes	30
3.1.3 Tipo do sinal de referência utilizado	31
3.1.4 Outros parâmetros	31
3.1.5 Soluções iniciais	32

3.2 Análise e seleção das soluções	32
3.2.1 Disponibilidade de material	33
3.2.2 Uso do sistema de som do automóvel como fonte secundária	33
3.2.3 Uso alternativo de controle local	34
3.2.4 Soluções finais	35
3.2.4.1 Materiais necessários e modelos físicos das soluções finais	35
3.2.4.1.1 Uso dos falantes do automóvel como fonte secundária	35
3.2.4.1.2 Fonte secundária próxima à cabeça do condutor	36
3.2.4.2 Revisão bibliográfica de sistemas experimentais análogos	37
3.3 Descrição do aparato experimental	40
3.3.1 Material utilizado	40
3.3.1.1 Subsistema de aquisição de sinais	40
3.3.1.2 Subsistema de processamento de sinais	43
3.3.1.3 Subsistema de transporte de sinal de controle e emissão de som secundário	45
4. RESULTADOS	48
4.1 Resultados para a solução 5 – controle utilizando sistema de som do automóvel	49
4.1.1 Configuração 1	49
4.1.2 Configuração 2	50
4.1.3 Configuração 3	51
4.1.4 Configuração 4	53
4.1.5 Configuração 5	54
4.2 Resultados para a solução 6 – controle local próximo aos ouvidos do condutor	55
4.2.1 Configuração 6	55
4.2.2 Configuração 7	56
4.2.3 Configuração 8	57
4.2.4 Configuração 9	58
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
6. CONCLUSÕES	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da patente de Lueg	18
Figura 2: (a) Modelo físico (HANSEN, 2003) e (b) esquema de um sistema de controle <i>feedback</i> (KUO, 1999)	20
Figura 3: (a) Modelo físico (HANSEN, 2003) e (b) esquema de um sistema de controle <i>feedforward</i> (KUO, 1999)	21
Figura 4: <i>Aliasing</i> de sinal no domínio do tempo (PECENIN, 2005)	23
Figura 5: <i>Aliasing</i> de sinal no domínio do tempo (PECENIN, 2005)	24
Figura 6: Filtro digital dividido em seções <i>feedback</i> e <i>feedforward</i> (SNYDER, 1994) ..	26
Figura 7: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de controle ativo de ruído (KUO, 1999)	27
Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema de controle ativo de ruído usando algoritmo FXLMS (KUO, 1999)	28
Figura 9: Esquema da montagem experimental da solução 5	36
Figura 10: Esquema da montagem experimental da solução 6	37
Figura 11: Montagem do sistema de controle utilizado por TAMAMURA e SHIBATA (1996)	38
Figura 12: Instrumentação da cabine utilizada por STANEF et al (2004) em seus experimentos de controle ativo de ruído	39
Figura 13: Resultados obtidos por STANEF et al (2004) para o ruído em um dado microfone instalado na cabine quando a fonte secundária localiza-se a $7\lambda/10$ (acima) e a $3\lambda/100$ (abaixo) da fonte primária	40
Figura 14: Microfone e pré-amplificador utilizados no projeto	41
Figura 15: Fonte utilizada no projeto	42
Figura 16: Notebook utilizado para acesso a informações da placa ANC	44
Figura 17: Circuito montado para regular a tensão de alimentação da placa de controle ..	45
Figura 18: Representação esquemática do circuito montado	45
Figura 19: Comando do sistema de som automotivo utilizado	46
Figura 20: Caixas de som utilizadas para controle de ruído	47
Figura 21: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 1.	50
Figura 23: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 2.	51
Figura 25: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 3.	52
Figura 27: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 4.	53
Figura 29: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 5.	55
Figura 31: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 6.	56
Figura 33: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 7.	57
Figura 35: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 8.	58
Figura 37: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 9.	59
Figura 39: Resultados de controle ativo de ruído em um veículo de 4 cilindros em linha, na posição do condutor. (a) (PERRY, 1989 apud ELLIOTT, 1993) e (b) (TAMAMURA; SHIBATA, 1995)	61

1. INTRODUÇÃO

A redução do ruído provocado por veículos automotores é desejada por quase todos os que de alguma forma são afetados pela sua presença – principalmente por seus ocupantes, em busca de maior conforto, e pelas montadoras, interessadas em oferecer esse conforto a seus clientes. Neste contexto, a atenuação sonora por métodos ativos se apresenta como uma solução eficaz, sendo no momento objeto de estudo de diversos centros de pesquisa acadêmicos e da indústria automotiva em geral. Em relação a métodos passivos, alternativa principal aos ativos, apresenta como vantagem a praticidade, não requerendo o espaço necessário para a utilização de isolamento acústico, nem causando o aumento de peso decorrente da implementação de controle passivo. O custo inerente a esses sistemas, que antigamente representava um obstáculo, tem decrescido continuamente, em virtude da diminuição dos preços dos componentes eletrônicos observada nas últimas décadas. Portanto, trata-se de um método viável e eficiente, com grande potencial de utilização em larga escala.

O objetivo deste trabalho é utilizar a teoria de acústica e controle para conceber um modelo físico de um sistema de controle ativo de ruído em uma cabine automotiva, com a intenção de minimizar a intensidade do ruído que atinge o condutor do automóvel. A partir desse modelo, será possível estender a técnica para que seja aplicada a todos os ocupantes do veículo.

Neste relatório é apresentada inicialmente a teoria básica de acústica, visando a introduzir a idéia de cancelamento de ruído. Em seguida, são expostos os fundamentos de controle ativo de ruído, tipos de sistemas utilizados, componentes de um sistema *feedforward*, incluindo a interface analógica-digital necessária para a captação e transmissão dos sinais e o sistema de controle propriamente dito. Com base na teoria exposta e em ampla pesquisa bibliográfica, são então propostas soluções iniciais para o problema; essas soluções passam por um breve estudo de viabilidade, do qual resultam soluções finais a serem implementadas na prática. Finalmente, essas soluções são

testadas em um automóvel sob condições semelhantes, e os resultados obtidos são analisados comparativamente para que seja feita a escolha da melhor solução.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos básicos de acústica

2.1.1 O fenômeno do som e a propagação sonora

Acústica é o ramo da física que estuda os fenômenos relacionados ao som. O som, por sua vez, pode ser entendido como resultado de vibrações das moléculas de um meio fluido que se propagam pelo mesmo na forma de ondas sonoras, gerando uma variação da pressão ambiente no local que é percebida pelo sistema auditivo. Finalmente, podemos definir ruído como um som indesejável (BISTAFA, 2006); a propagação desse som indesejável é o que normalmente se pretende controlar.

A propagação da onda sonora ocorre da seguinte forma: quando é promovido um distúrbio em uma dada região do fluido, as moléculas em torno dessa região se movimentam, entrando em contato com outras ao seu redor através de choques e induzindo movimento a elas. Esse fenômeno se repete sucessivamente, numa reação em cadeia, atingindo moléculas cada vez mais distantes da origem da perturbação inicial. É importante notar que a compressibilidade do fluido em questão influi diretamente na velocidade de propagação sonora; de fato, quanto maior a incompressibilidade, mais rapidamente a reação em cadeia atinge moléculas mais distantes da origem, o que nos permite concluir que a *velocidade do som* (c) - que é a velocidade de propagação da onda, e não das partículas individualmente - é maior em sólidos do que em líquidos, e maior em líquidos do que em gases.

No estudo de sons periódicos, a duração de um ciclo é denominada *período* (T); ao número de ciclos por unidade de tempo denomina-se *frequência* (f); e a distância percorrida pelo som durante um ciclo, finalmente, é chamada de *comprimento de onda* (λ). Essas três grandezas se relacionam a partir das seguintes relações:

$$\lambda = c.T \text{ (m/s)} \quad (2.1.1.1)$$

$$f = 1/T \text{ (Hz)} \quad (2.1.1.2)$$

Tais definições serão de grande utilidade no decorrer do texto, quando for deduzida a equação de onda unidimensional e forem apresentadas suas soluções.

2.1.2 O nível de pressão sonora

A pressão sonora “é a grandeza mais importante para caracterizar os efeitos do som sobre o ser humano” (BISTAFA, 2006, p.14), de modo que se fez necessário, no desenvolvimento da acústica, utilizar uma grandeza que quantificasse a sensação subjetiva da intensidade sonora de forma conveniente. Essa grandeza é o *nível de pressão sonora* (L_p), dado por:

$$L_p = 10.\log\left(\frac{p_{\text{eficaz}}^2}{p_0^2}\right) = 20.\log\left(\frac{p_{\text{eficaz}}}{p_0}\right) \text{ (dB)} \quad (2.1.2.1)$$

com p_0 sendo uma pressão sonora de referência (normalmente tomada como a do limiar de audibilidade, 20 μPa) e p_{eficaz} dado por:

$$p_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} p^2(t).dt} \text{ (Pa)} \quad (2.1.2.2)$$

A grande vantagem do uso do nível de pressão sonora no lugar do simples uso da pressão eficaz é o fato da primeira ser expressa em uma escala logarítmica (o decibel). De fato, como os valores de pressão eficaz normalmente envolvidos nas questões de acústica variam dentro de uma ampla gama de valores (que se estende de 10^{-5} Pa e 10^3 Pa) e a percepção humana do volume de um ruído apresenta um comportamento

aproximadamente logarítmico (NELSON; ELLIOTT, 1992), o uso do nível de pressão sonora (e, conseqüentemente, do decibel) torna-se claramente mais adequado no estudo da acústica.

2.1.3 A equação de onda tridimensional e o princípio da superposição

Para obter uma expressão da variação temporal e espacial da pressão sonora em uma dada região por onde a onda se propaga, é necessário lançar mão dos princípios de conservação de massa e de quantidade de movimento, os quais relacionam as variáveis pressão, densidade e velocidade do fluido (NELSON; ELLIOTT, 1992).

Aplicando a equação de conservação de massa a um pequeno volume infinitesimal de fluido, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.1.3.1)$$

sendo ρ_0 a densidade do fluido antes da perturbação, ρ a variação da densidade do fluido decorrente da passagem da onda acústica e $\mathbf{u}$ o vetor velocidade do fluido em uma dada posição, com $\mathbf{u} = u_1 \mathbf{i} + u_2 \mathbf{j} + u_3 \mathbf{k}$, sendo $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$ e $\mathbf{k}$ os versores em três direções ortogonais no espaço.

Ainda considerando o volume infinitesimal de fluido utilizado acima, pode-se aplicar a equação da conservação da quantidade de movimento, que resulta:

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2.1.3.2)$$

sendo $p(x,y,z)$ a distribuição de pressões no tempo e no espaço.

Para eliminar os termos dependentes de $\mathbf{u}$, pode-se calcular o divergente da equação (2.1.3.2) e a derivada temporal da equação (2.1.3.1) (MASIERO, 2007). Combinando as duas equações resultantes, obtém-se:

$$\nabla p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1.3.3)$$

que é conhecida como a equação de onda tridimensional linearizada, pois, em sua dedução, se assumiu que as variações de pressão, densidade e velocidade da partícula são muito pequenas em relação a seus valores ambiente – ou seja, que as variáveis p , ρ e $\mathbf{u}$ são linearmente relacionadas uma em relação à outra.

Uma das conseqüências do comportamento das variáveis citadas acima ser aproximadamente linear é o fato de que a equação de onda tridimensional é linear em relação à pressão, ou seja, não há nenhum termo como $p^2(x,y,z,t)$. Assim sendo, os operadores diferenciais parciais dessa equação também são lineares, e podemos escrever, para duas flutuações de pressão $p_1(x,y,z,t)$ e $p_2(x,y,z,t)$ quaisquer (NELSON; ELLIOTT, 1992):

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p_1(x,t) = 0 \quad \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p_2(x,t) = 0, \quad (2.1.3.4 \text{ a,b})$$

e segue que:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) [p_1(x,t) + p_2(x,t)] = 0 \quad (2.1.3.5)$$

o que é conhecido como princípio da superposição; em outras palavras, dois campos sonoros que têm flutuações de pressão que variam nas direções x , y , z e no tempo t ,

podem simplesmente ser adicionados em cada posição (x,y,z) e tempo t (NELSON; ELLIOTT, 1992). Dessa forma, o campo de pressões resultante é dado por:

$$[p_1(x,t) + p_2(x,t)] = p(x,t) \quad (2.1.3.6)$$

2.2 Fundamentos de controle ativo de ruído

2.2.1 Histórico

Pode se creditar o início da técnica de controle ativo de ruído ao cientista alemão Paul Lueg: foi de sua autoria a primeira patente registrada sobre o assunto, proposta em 1934 e aceita em 1936, na qual ele descrevia uma técnica para controlar o ruído em um tubo pela introdução de mais ruído (como esquematizado na figura 1). Os componentes de seu sistema se resumem a um microfone, para detectar as ondas que se propagam através do tubo, um alto-falante, para emitir o anti-ruído, e um sistema eletrônico conectando microfone e falante (“V”, na figura 1), responsável por produzir as alterações necessárias no sinal captado pelo microfone a fim de que o alto-falante emita uma réplica invertida da onda detectada no instante certo para que haja a interferência desejada (GIORGI, 1998).

É interessante observar que esses três componentes da patente de Lueg são suficientes para o controle ativo do ruído que se propaga em um duto. Apesar disso, apenas meio século depois de sua publicação o controle ativo de ruído passou a ser comercialmente implementado. Isso se deve, principalmente, à dificuldade de se obter o sistema eletrônico “V”, que só foi superada quando do desenvolvimento de processadores digitais mais rápidos e baratos, nas décadas finais do século XX (NELSON; ELLIOTT, 1992). Desse modo, os avanços obtidos nas quatro décadas seguintes à patente de Lueg se dividiram entre estudo de possíveis aplicações da técnica e desenvolvimento de novas ferramentas em eletrônica e controle.

Durante a década de 1970, foi observado aumento no número de estudos e publicações referentes ao controle ativo de ruído, utilizando os desenvolvimentos tecnológicos das décadas anteriores em eletrônica, controle e processamento de sinais nas aplicações em que se fazia necessário reduzir os níveis de ruído. Apenas a partir de meados da década de 1980, entretanto, tem início o estudo de controle ativo de ruído para uso em automóveis e afins, tendo se intensificado nas duas décadas seguintes com o auxílio de métodos numéricos (como softwares de simulação pelo método dos elementos finitos, por exemplo), que permitem análises eficazes com menor dispêndio de tempo e recursos financeiros, e de tecnologias *wireless*, as quais permitem maior facilidade de instrumentação e aquisição de dados.

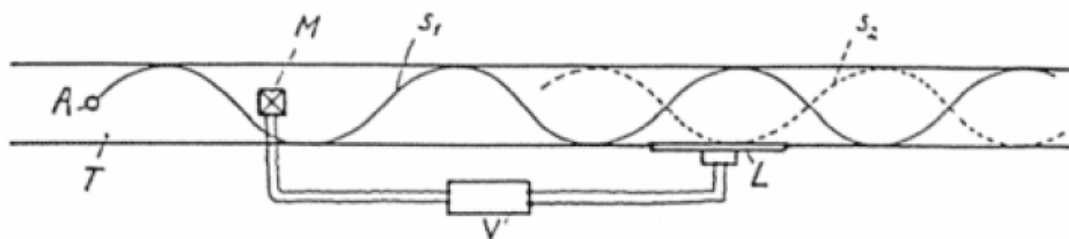


Figura 1: Esquema da patente de Lueg

2.2.2 Estratégias de controle: *feedback* e *feedforward*

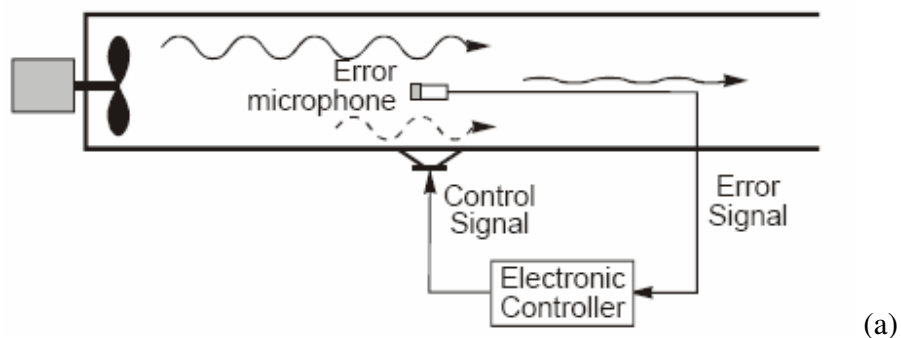
Para calcular o ruído gerado por um certo dispositivo (também chamado de fonte primária), é necessário fazer a aquisição de um sinal de referência proveniente dessa fonte, a ser processado pelo sistema de controle digital. Com base nesse sinal processado, o sistema emite outro sinal para os alto-falantes (ou fontes secundárias), que o transformam em anti-ruído para promover a atenuação acústica do ambiente.

Em relação à estratégia utilizada para a aquisição do sinal de referência, os sistemas de controle ativo de ruído se dividem em duas categorias: sistemas de controle *feedback* (nos quais o sinal é recebido após haver interferência entre o ruído primário e o secundário) e sistemas de controle *feedforward* (no qual o sinal de referência é recebido

diretamente na fonte primária). A seguir, será desenvolvida uma breve explicação do funcionamento de cada um desses sistemas, assumindo um único sinal de referência, uma única fonte de controle e, no caso *feedforward*, um único sinal de erro.

2.2.2.1 Sistemas de controle *feedback*

A idéia básica de um sistema de controle ativo de ruído *feedback* é estimar o ruído primário (a ser cancelado) e usa-lo como um sinal de referência $x(n)$ de entrada para o filtro digital. A figura 2a apresenta um modelo físico desse tipo de sistema, e a figura 2b, sua esquematização, na qual $d(n)$ é o ruído primário, $e(n)$ é o sinal obtido do microfone de erro, $C(z)$ é o chamado caminho secundário – modificações que o ruído secundário pode sofrer em seu caminho até ser amostrado como sinal de erro (como, por exemplo, nas interfaces analógicas-digitais pelas quais ele passa ao ser gerado e amostrado) – e $y(n)$ (que na figura é o sinal $x(n)$ após passar pelo filtro $W(z)$) é o sinal secundário gerado pelo filtro adaptativo. Como na maioria dos casos $C(z)$ é desconhecido, devemos estimar $d(n)$, a partir de uma técnica chamada de síntese (regeneração) do sinal de referência, na qual o sinal secundário é filtrado pela estimativa do caminho secundário, $\hat{C}$, e então combinado com o sinal obtido no sensor de erro para regenerar o ruído principal (KUO, 1999).



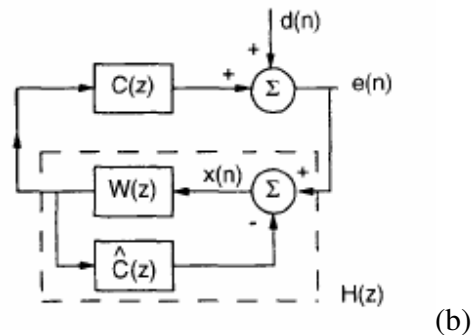


Figura 2: (a) Modelo físico (HANSEN, 2003) e (b) esquema de um sistema de controle *feedback* (KUO, 1999)

2.2.2.2 Sistemas de controle *feedforward*

O sistema *feedforward* é aquele no qual um filtro adaptativo é utilizado para estimar a resposta acústica entre o sensor de referência e o sensor de erro da região na qual se pretende controlar o ruído. É importante deixar claro que nesse tipo de sistema o sinal de referência é obtido diretamente na fonte de ruído; o sensor que capta o sinal acústico após a interferência entre ruído e anti-ruído é chamado de sensor de erro. Minimizar o ruído captado por esse sensor é o objetivo desse tipo de controle, e a função principal do filtro adaptativo (KUO, 1999). A figura 3a apresenta um modelo físico, e a figura 3b, uma esquematização desse tipo de sistema, na qual $E(z)$ é o sinal de erro captado, $P(z)$ é a resposta acústica local (chamada de caminho primário) que interfere no ruído primário, $S(z)$ é o caminho secundário (como no sistema de controle *feedback*), $W(z)$ é o filtro adaptativo e $X(z)$ é o ruído primário.

Os sistemas *feedforward* são utilizados sempre que sua aplicação é possível, em detrimento dos sistemas *feedback*. Isso ocorre porque o potencial de atenuação acústica é maior no primeiro sistema, o qual converge (ou seja, torna-se estável) de forma muito mais rápida do que os sistemas *feedback*, pois emite um anti-ruído para cancelar o distúrbio primário de forma instantânea, graças à captação do sinal de referência direto da fonte. Sendo possível obter um sinal de referência com relativa facilidade no estudo aqui desenvolvido, o sistema de controle a ser utilizado será o *feedforward* (SNYDER,

1994). Nas seções seguintes, serão detalhados os componentes desse tipo de sistema e como eles funcionam.

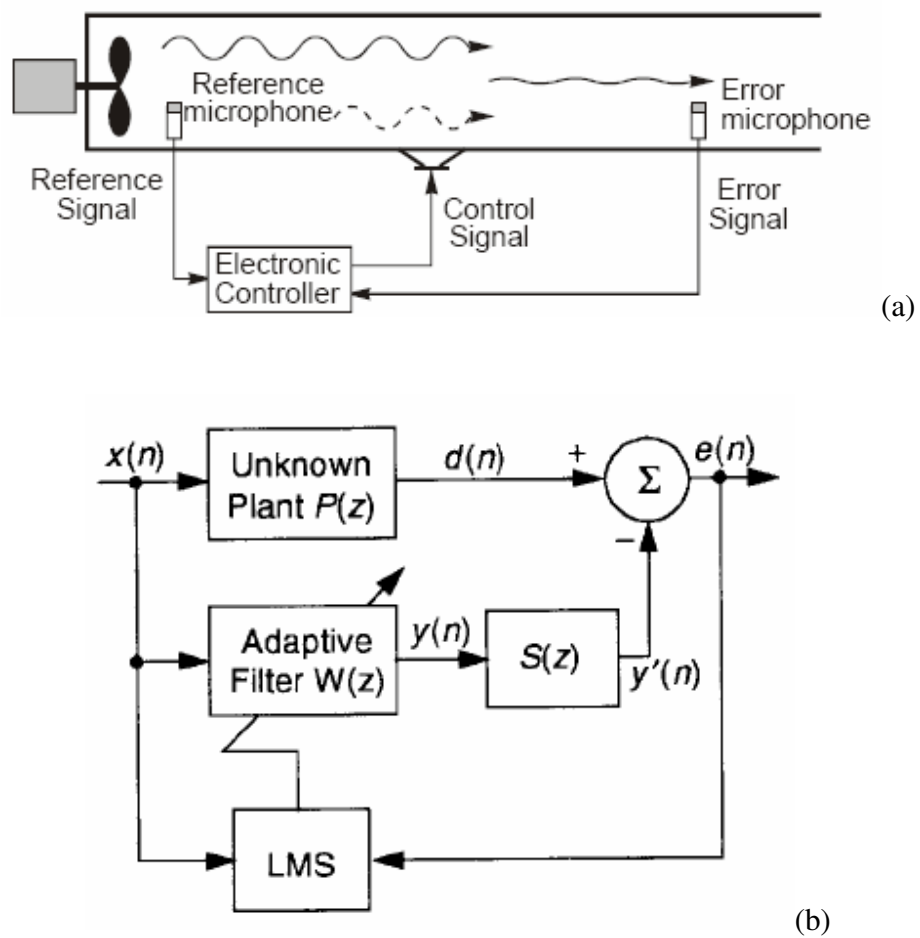


Figura 3: (a) Modelo físico (HANSEN, 2003) e (b) esquema de um sistema de controle *feedforward* (KUO, 1999)

2.3 Componentes do sistema de controle *feedforward*

2.3.1 Interface Analógica-Digital

2.3.1.1 Conversores AD e DA

Um sinal é definido como uma função que transmite informações sobre a natureza de um fenômeno físico. Segundo Moraes e Domingues (1996, p.1):

Um sinal será considerado analógico quando puder ser representado através de uma variável que possua como domínio um espectro de valores contínuos. Quando a variável que representa o sinal puder assumir somente um conjunto finito de valores, este será dito como sendo digital. Neste caso, o sinal poderá ser representado através de uma sequência de dígitos binários.

Visto que a maioria dos processos em que se aplica controle contém elementos analógicos, pode-se afirmar que o processo de conversão de sinais (de analógico para digital e vice-versa) é essencial para que haja interface entre os elementos analógicos e digitais do sistema (KUO, 1980). De fato, os sinais de saída de dispositivos analógicos devem ser convertidos para sinais digitais antes de serem processados por um controle digital; do mesmo modo, o sinal digital de saída do controle deve passar por uma conversão digital-analógica para que possa ser implementado no dispositivo que se está controlando.

O que o conversor analógico-digital faz é simplesmente receber um sinal analógico, normalmente uma tensão elétrica, e o converter em um conjunto de números que é enviado ao sistema de controle digital, em intervalos de tempo fixos, num processo chamado de amostragem. Uma variável importante desse processo é a chamada frequência de amostragem, definida como o número de vezes que as informações são enviadas do conversor ao microprocessador por unidade de tempo. Obviamente, a ação do conversor digital-analógico é a contrária: ele recebe como entrada uma dada quantidade de números, fornecendo como saída para o atuador um sinal contínuo.

Além dos conversores, como já foi visto antes, há outros três sub-sistemas que integram a interface analógica-digital: os circuitos *sample and hold*, os filtros *anti-aliasing* e os filtros de reconstrução. Eles serão apresentados nos itens abaixo.

2.3.1.2 Circuitos “sample and hold”

Os circuitos *sample and hold* estão presente nos dois tipos de conversão; sua função é progressivamente extrapolar o sinal de saída entre amostras sucessivas de alguma forma preestabelecida. O circuito *sample and hold* mais utilizado é o chamado seguidor de ordem zero, que simplesmente mantém constante a saída entre uma dada amostra e a amostra seguinte.

2.3.1.3 Filtros *Anti-Aliasing*

Os filtros *anti-aliasing*, por sua vez, estão presentes apenas na conversão analógica-digital. Como o próprio nome aponta, são filtros que evitam o chamado *aliasing* - fenômeno que faz com que um componente de alta frequência assuma a identidade de um de baixa frequência. Isto ocorre, por exemplo, quando um sinal é amostrado a uma taxa menor que a definida pelo teorema da amostragem (que impõe que a frequência de amostragem de um sinal deve ser no mínimo duas vezes a maior componente de frequência desse sinal). Como a maioria dos sinais reais não é limitada em banda, podendo facilmente conter componentes com frequências maiores do que a de interesse, incluindo ruído, é necessário realizar uma pré-filtragem analógica antes da amostragem pelo conversor analógico-digital, para remover a parte indesejada do espectro do sinal que poderia corromper o sinal convertido (PECENIN, 2005); é isso o que faz o filtro *anti-aliasing*. As figuras abaixo apresentam exemplos de *aliasing* nos domínios do tempo e da frequência.

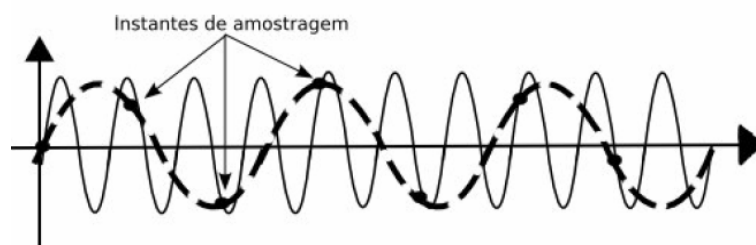


Figura 4: *Aliasing* de sinal no domínio do tempo (PECENIN, 2005)

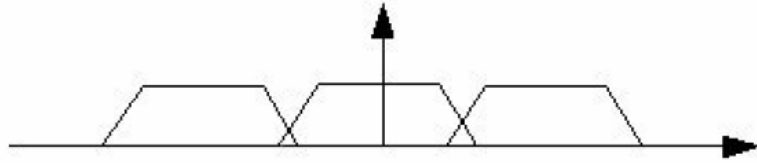


Figura 5: *Aliasing* de sinal no domínio do tempo (PECENIN, 2005)

2.3.1.4 Filtros de reconstrução

Finalmente, os filtros de reconstrução estão presentes apenas na conversão analógica-digital, e tem função oposta aos filtros *anti-aliasing*: eles recebem um sinal no tempo em forma de degrau e os transformam em uma curva suave para implementação pelo atuador. Da mesma forma que os filtros *anti-aliasing*, também são filtros do tipo passa-baixa, removendo altas frequências do sinal.

2.3.2 Filtro digital

Um filtro digital é uma estrutura que realiza na prática alguma função de transferência desejada. No caso em questão, o filtro transforma um sinal de referência em um sinal de controle que permita o máximo nível de atenuação sonora.

De forma geral, o valor do sinal de saída de um filtro digital no instante k é a igual à soma de sinais de entrada (no instante k e anteriores) e de saída (em instantes anteriores) multiplicados por alguns coeficientes, como segue:

$$y(k) = b_0x(k) + b_1x(k-1) + \dots + b_nx(k-n) + a_1y(k-1) + \dots + a_my(k-m) \quad (2.3.2.1)$$

em que a e b são coeficientes dos filtros, ou pesos. Logo, a função de transferência discreta associada com a equação acima (calculada usando transformada z) é igual a:

$$\frac{y(z)}{x(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_nz^{-n}}{1 - a_1z^{-1} - a_2z^{-2} - \dots - a_mz^{-m}} \quad (2.3.2.2)$$

Dois tipos de filtros são utilizados com frequência em controle ativo de ruído: filtros FIR (*finite impulse response*), também chamados de transversais e IIR (*infinite impulse response*), ou recursivos. A básica diferença entre os dois é mostrada na figura 6: filtros IIR apresentam uma seção de *feedback* e uma seção de *feedforward* (ou seja, $y(k)$ é expresso como mostrado na equação (2.3.2.1)), enquanto os filtros FIR apresentam apenas a seção *feedforward* (e $y(k)$ é obtido apenas em função dos termos da forma $b_i x(k-i)$, $i=0,1,\dots,n$), o que faz com que esses filtros apresentem características diferentes entre si:

- Filtros FIR:
 - São sempre estáveis para coeficientes limitados;
 - Requerem muitos termos para que haja convergência rápida;
 - Pequenas mudanças em seus coeficientes causam pequenas mudanças em sua resposta em frequência.

- Filtros IIR:
 - Nem sempre são estáveis;
 - Não necessita de muitos termos para convergir rapidamente na maioria dos casos;
 - Pequenas mudanças em seus coeficientes podem causar grandes mudanças em sua resposta em frequência.

A partir das características expostas acima, e de outras a serem apresentadas, será feita a escolha do filtro mais adequado para o caso veicular, o que será exposto em um capítulo posterior.

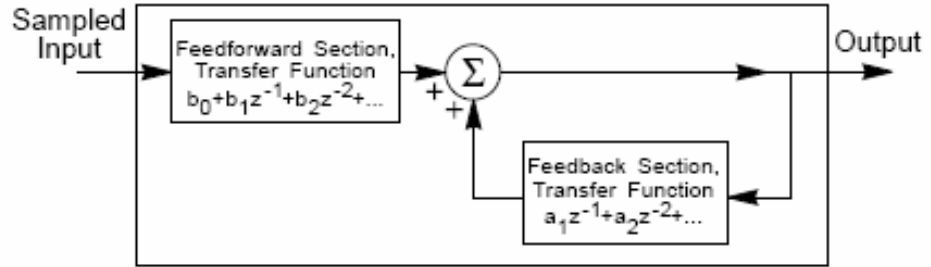


Figura 6: Filtro digital dividido em seções *feedback* e *feedforward* (SNYDER, 1994)

2.3.3 Algoritmo adaptativo

O algoritmo adaptativo é a parte do sistema de controle responsável por ajustar os coeficientes do filtro digital de modo que a atenuação alcançada seja a maior possível. A maior parte desses algoritmos calcula os valores do filtro em um instante $n+1$ adicionando ao valor do filtro em um instante n uma pequena porcentagem de um certo “erro” calculado em função do valor do sinal de erro ao quadrado (sendo, por isso, chamados de algoritmos LMS – *least-mean-square*):

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) - \frac{\mu}{2} \nabla e^2(n) \quad (2.3.3.1)$$

onde $\mathbf{w}(n+1) = [w_0(n+1) \ w_1(n+1) \ ... \ w_{L-1}(n+1)]$ é o vetor de valores dos coeficientes dos filtros no instante $(n+1)$, a ser calculado (com L sendo a ordem de extensão do filtro), $\mathbf{w}(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ ... \ w_{L-1}(n)]$ é o vetor de valores dos coeficientes dos filtros no instante n , conhecidos, μ é um número positivo que define a porcentagem do gradiente negativo a ser considerada na equação (conhecida como coeficiente de convergência) e $\nabla e^2(n)$ é a estimativa do gradiente do erro quadrático no instante (n) . Podemos formular o erro obtido pelo sensor de erro, $e(n)$, como (ver figura 7):

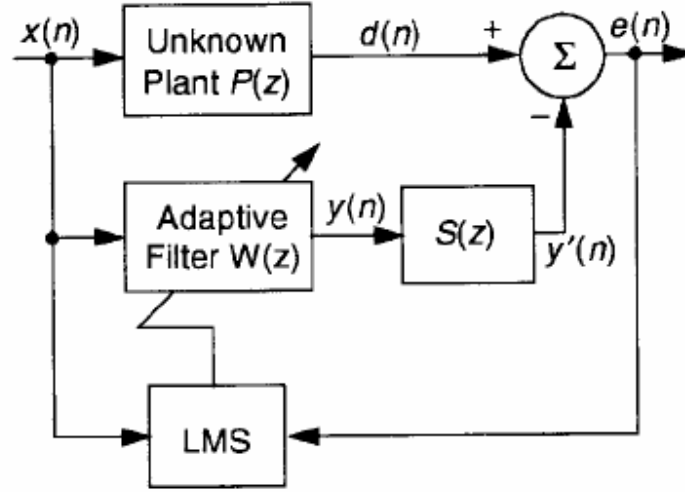


Figura 7: Diagrama de blocos simplificado de um sistema de controle ativo de ruído (KUO, 1999)

$$e(n) = d(n) - s(n) * [\mathbf{w}^T(n) \cdot \mathbf{x}(n)] \quad (2.3.3.2)$$

onde $d(n)$ é o sinal primário modificado pelo caminho primário, $s(n)$ é a resposta ao impulso do caminho secundário $S(z)$, $*$ denota convolução linear e $\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]$ é o vetor de sinais de referência obtidos nos L instantes de tempo anteriores ao instante $n+1$. Calculando a estimativa do gradiente do erro quadrático no instante n :

$$\nabla e^2(n) = 2 \cdot [\nabla e(n)] \cdot e(n) = -2 \cdot \mathbf{x}'(n) \cdot e(n) \quad (2.3.3.3)$$

com $\mathbf{x}'(n) = s(n) \cdot \mathbf{x}(n)$. Dessa forma, chegamos a:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \cdot \mathbf{x}'(n) \cdot e(n) \quad (2.3.3.4)$$

que é o algoritmo adaptativo a ser utilizado pelo filtro digital. Há um problema no uso desse algoritmo no caso de um sistema como mostrado na figura 7: o termo $\mathbf{x}'(n)$ não pode ser obtido diretamente pelo método LMS convencional, visto que é o fator $\mathbf{x}(n)$ que é utilizado como entrada. Dessa forma, foi proposto por Morgan (1980) o método

Filtered-X LMS (ou FXLMS), apresentado na figura 8, pelo qual os sinais $\mathbf{x}(n)$ são “filtrados” por uma estimativa do caminho secundário, $\hat{\mathbf{S}}(n)$, da seguinte forma:

$$\mathbf{x}'(n) = \hat{\mathbf{S}}(n) * \mathbf{x}(n) \quad (2.3.3.5)$$

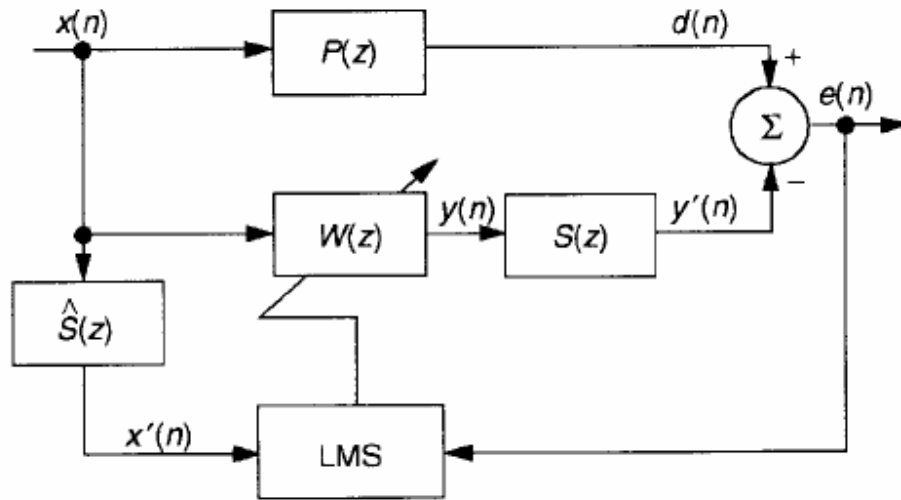


Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema de controle ativo de ruído usando algoritmo FXLMS (KUO, 1999)

É essa forma que se utiliza com maior frequência nas aplicações de controle ativo de ruído *feedforward* atuais. Há, ainda, uma modificação do algoritmo FXLMS bastante utilizada, conhecida como algoritmo *Leaky FXLMS*, no qual se insere um coeficiente denominado *leakage factor* (v , $0 < v < 1$) multiplicando o vetor $\mathbf{w}(n)$, tal que:

$$\mathbf{w}(n+1) = v \cdot \mathbf{w}(n) + \mu \cdot \mathbf{x}'(n) \cdot e(n) \quad (2.3.3.6)$$

o que reduz os erros de arredondamento do processo, evitando que ocorra *overflow* no processador e, portanto, mal funcionamento do filtro. Vale ressaltar que os coeficientes $\hat{\mathbf{S}}(n)$, por sua vez, são obtidos de forma análoga aos próprios coeficientes do filtro digital, de forma que também há um coeficiente de convergência e um *leakage factor* na estimação do caminho secundário:

$$\hat{\mathbf{s}}(n+1) = v_s \cdot \hat{\mathbf{s}}(n) - \frac{\mu_s}{2} \nabla e_s^2(n) \quad (2.3.3.7)$$

Finalmente, pode-se escrever a equação (2.3.3.8) para o caso de haver mais de um sinal de erro e/ou sinal de controle. Teremos:

$$\mathbf{w}_k(n+1) = \mathbf{w}_k(n) + \mu \cdot \sum_{m=1}^M \mathbf{x}'_{km}(n) \cdot e_m(n) \quad (2.3.3.8)$$

para $k=1,2,\dots,K$ e $m=1,2,\dots,M$, onde K é o número de sinais de controle e M é o número de sensores de erro, e com $\mathbf{x}'_{km}(n) = \hat{\mathbf{s}}_{mk}(n) * \mathbf{x}(n)$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Escolha de soluções iniciais para o caso veicular

A bibliografia selecionada para a execução desse trabalho aponta para diversas formas de se realizar controle ativo de ruído em cabines fechadas, incluindo o caso específico de cabines veiculares. De fato, há diversas variáveis que podem ser alteradas em um sistema de controle, as quais influem diretamente na eficácia do sistema, na dificuldade de se montar o aparato experimental e no custo total envolvido no projeto. Nesse capítulo, tomando como base a teoria exposta nos itens anteriores e a bibliografia supracitada, será feita uma análise das variáveis de desempenho principais para o caso veicular, a partir da qual serão escolhidas algumas configurações de montagem a serem executadas na prática.

3.1.1 Filtros (FIR ou IIR)

Os dois tipos de filtros mais utilizados em controle ativo de ruído foram apresentados na seção 2.3.2, na qual se afirmou que os filtros FIR são estáveis e convergem rápido, desde que tenham um número suficiente de termos. Além dessas características, os filtros FIR, segundo SNYDER e VOKALEK (1994), são ideais para problemas em uma faixa restrita de frequência e na qual o sinal de controle não corrompe o sinal de referência – condições que são seguidas para o caso de controle ativo em cabine veicular. Filtros IIR, sendo mais úteis em casos de controle ativo em uma ampla gama de frequências, não são ideais para o caso em estudo. Dessa forma, serão utilizados filtros FIR no decorrer do projeto.

3.1.2 Número e disposição dos alto-falantes

Como citado anteriormente, o intuito desse trabalho é minimizar o ruído que atinge o condutor de um automóvel. Dessa forma, claramente a localização dos sensores

de erro (microfones) deve ser no encosto do assento do motorista, próximo a onde estariam localizados os ouvidos do condutor. Quanto às fontes de controle, entretanto, não há uma localização que possa se chamar de óbvia. Há trabalhos publicados sobre controle de ruído automotivo com as fontes de controle posicionadas nas mais diversas posições; para este trabalho, serão utilizadas quatro configurações de alto-falantes: nas duas primeiras, baseadas na distribuição apresentada em ELLIOTT (1993), as fontes de controle ficarão em posições próximas às dos alto-falantes localizados nas portas dianteiras do sistema de som do automóvel (sendo que na primeira apenas uma fonte de controle será utilizada, enquanto na segunda serão duas). Nas outras duas configurações a serem utilizadas, haverá apenas um alto-falante, localizado, em uma das soluções, o mais próximo possível da fonte sonora (perto dos pedais do veículo) e, na outra solução, o mais distante possível da fonte sonora (perto do vidro traseiro do automóvel).

3.1.3 Tipo do sinal de referência utilizado

Na captação do sinal de referência da fonte primária, três tipos de instrumentos são normalmente utilizados: um tacômetro (medindo as rotações do eixo de saída da máquina), um acelerômetro (medindo a vibração causada pelo funcionamento do motor) e um microfone (medindo diretamente o ruído produzido pelo motor). Os dois primeiros sinais precisariam ser processados de forma a indicar indiretamente o ruído produzido pelo motor, gerando um trabalho computacional a mais. Como é perfeitamente possível, no presente caso, captar diretamente o ruído do motor com eficácia, será utilizado um microfone na obtenção do sinal de referência.

3.1.4 Outros parâmetros

Além dos três parâmetros acima discutidos, há ainda outros fatores que influem no bom funcionamento do sistema de controle ativo de ruído, como extensão dos filtros, valores dos coeficientes de convergência e *leakage*, configurações do sistema de identificação do caminho secundário, entre outros. Esses parâmetros, entretanto, não

devem ser estimados *a priori*; a partir do funcionamento do sistema e das condições de contorno (ainda desconhecidas) presentes durante a análise, eles são ajustados iterativamente, de forma a se alcançar o controle ideal.

3.1.5 Soluções iniciais

A partir das análises anteriores, foram definidas as primeiras soluções, passíveis de serem desenvolvidas futuramente. É importante ressaltar que nem todas serão necessariamente implementadas; são apenas aquelas que se destacaram levando-se em conta os fatores acima considerados:

- Solução 1: Filtros FIR, uma fonte de controle posicionada próxima ao alto-falante da porta dianteira esquerda do automóvel, sinal de referência captado por microfone.
- Solução 2: Filtros FIR, duas fontes de controle posicionadas próximas aos alto-falantes das portas dianteiras do automóvel, sinal de referência captado por microfone.
- Solução 3: Filtros FIR, uma fonte de controle posicionada próxima ao vidro traseiro do automóvel, sinal de referência captado por microfone.
- Solução 4: Filtros FIR, uma fonte de controle posicionada próxima à fonte primária, sinal de referência captado por microfone.

3.2 Análise e seleção das soluções

Escolhidas as quatro soluções acima, a partir de critérios de desempenho (ou seja, capacidade de atenuação de ruído), os passos seguintes foram analisar a real possibilidade das soluções serem efetivamente construídas, e então iniciar a montagem do aparato experimental. Para tanto, nesse segundo momento, serão analisados aspectos práticos da construção dessas soluções, os quais envolvem variáveis como custo e praticidade, que afetam diretamente a decisão de seguir em frente com a idéia ou

abandona-la. No decorrer dessa análise, serão filtradas algumas soluções para que se chegue às soluções finais.

3.2.1 Disponibilidade de material

Em virtude da não-obtenção de recursos financeiros e logísticos requisitados para a condução desse projeto, uma das restrições (na realidade, a maior) encontradas para a montagem do aparato experimental é a de verba para compra de material. De fato, a instrumentação para medições e emissões precisas de som é relativamente cara (para os padrões acadêmicos), e todo o material de que se dispõe atualmente provém do professor orientador (falante e microfones) e de colaboradores (placa que contem os algoritmos de controle ativo); o restante será adquirido pelo próprio aluno, cujos recursos não são suficientes para adquirir sensores, atuadores e fios de alta qualidade.

Dessa forma, as soluções iniciais escolhidas devem atender a um requisito básico: serem passíveis de construção sem que seja necessário utilizar muitos dispositivos. Essa restrição é particularmente importante no caso da solução 3, na qual as fontes de controle seriam instaladas junto ao vidro traseiro do automóvel. A elevada distância entre a posição em questão e a fonte primária faria com que fosse necessário utilizar mais do que um falante para que fosse possível promover a atenuação de forma aceitável; portanto, essa questão certamente inviabiliza a construção dessa solução.

3.2.2 Uso do sistema de som do automóvel como fonte secundária

Ainda considerando a questão financeira, uma alternativa interessante às soluções 1, 2 e 4 é o uso do próprio sistema de som do automóvel a ser utilizado para os testes como fonte secundária. Com isso, não seria necessário o uso de falantes externos, e haveria as vantagens adicionais de se simular uma configuração experimental que não alterasse significativamente o acabamento interior do veículo, e de se poder escolher por efetuar o controle pelos falantes localizados em ambas as portas, ou de forma individual por qualquer um dos dois, simplesmente alterando o balanço do som no comando do

sistema. Além disso, os falantes localizam-se próximos ao falante que seria instalado para que fosse testada a solução 4 – ou seja, podem ser esperados resultados semelhantes, não sendo necessária a implantação das duas soluções.

O uso do sistema de som do automóvel se dá da seguinte forma: o comando do sistema (popularmente chamado de “rádio”) contém um canal de entrada, o qual recebe o sinal de saída da placa de controle ativo, e o envia para os falantes localizados nas portas dianteiras do veículo. Neles, o anti-ruído será produzido para efetuar o cancelamento do ruído indesejado.

Em decorrência das razões apresentadas no primeiro parágrafo, e da simplicidade de uso atestada no segundo, as soluções 1, 2 e 4 serão substituídas por uma nova solução:

- Solução 5: Filtros FIR, uma ou duas fontes de controle posicionadas nos falantes originais do automóvel, sinal de referência captado por microfone.

3.2.3 Uso alternativo de controle local

O uso de controle local ao invés das estratégias de controle global previamente sugeridas foi uma idéia concebida durante a análise das soluções iniciais, e aparentemente apresenta potencial para promover atenuação sonora tão eficaz quanto as primeiras, sendo assim adicionada à lista das que serão implementadas experimentalmente. A idéia básica desse método de controle é promover a atenuação do som na região próxima à cabeça do motorista, criando uma “zona de silêncio”, ao invés de minimizar o ruído que deixa o motor do automóvel de forma geral, o que promove indiretamente a redução de ruído para o condutor. A escolha dessa solução para ser montada experimentalmente possibilita que se faça uma comparação entre controle local e global, de modo a se definir a melhor estratégia de controle para o caso automotivo. Assim sendo:

- Solução 6: Filtros FIR, uma fonte de controle posicionada junto à cabeça do condutor, sinal de referência captado por microfone.

3.2.4 Soluções finais

Nas seções 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3, foram eliminadas e/ou modificadas as soluções iniciais, além de ser adicionada uma nova idéia. Assim, serão consideradas as seguintes soluções para a continuidade do projeto:

- Solução 5: Filtros FIR, uma ou duas fontes de controle posicionadas nos falantes originais do automóvel, sinal de referência captado por microfone.
- Solução 6: Filtros FIR, uma fonte de controle posicionada junto à cabeça do condutor, sinal de referência captado por microfone.

Elas são aqui denominadas de “soluções finais” porque passaram pelas análises de desempenho e de possibilidade de implantação, tendo sido consideradas viáveis a serem desenvolvidas experimentalmente. As seções seguintes apresentam maiores detalhes sobre seu desenvolvimento experimental.

3.2.4.1 Materiais necessários e modelos físicos das soluções finais

3.2.4.1.1 Uso dos falantes do automóvel como fonte secundária

Ao contrário da solução anterior, a aqui descrita (fontes de controle posicionadas nos falantes originais dos automóveis) é a que requer menos material das três, em virtude de utilizar o sistema de som original do automóvel. Assim, apenas são necessários (no mínimo) dois microfones, uma placa de controle ativo de ruído, materiais de apoio e o computador portátil (ou seja, não há necessidade de se instalar um

falante de controle em lugar algum). A figura 9 ilustra a montagem dos componentes no interior do automóvel, sendo os fios representados pelos traços em vermelho, microfone da fonte primária pelo número 1, comando de som do veículo pelo número 2, placa de aquisição pelo número 3 (porém abaixo do assento), computador portátil pelo número 4 (acima do banco), microfone de erro (no encosto do assento do condutor) pelo número 5 e falantes de controle (originais do carro) pelo número 6.

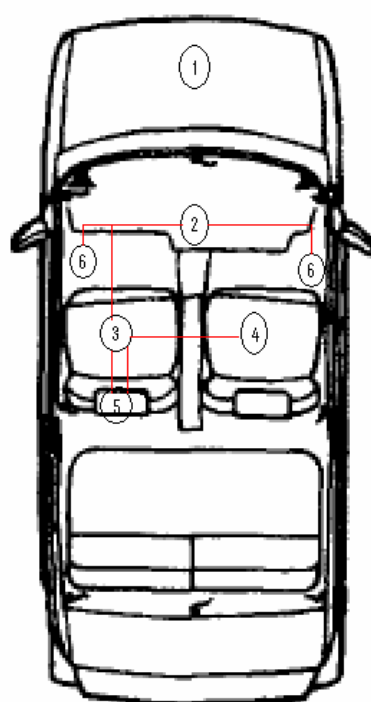


Figura 9: Esquema da montagem experimental da solução 5

3.2.4.1.2 Fonte secundária próxima à cabeça do condutor

Nesta última solução (controle local utilizando fonte secundária localizada próxima à cabeça do condutor), serão utilizados, no mínimo, dois microfones, um pequeno falante de controle, uma placa de controle ativo de ruído, materiais de apoio e o computador portátil. A figura 10 ilustra a montagem experimental dessa solução, sendo

os fios representados pelos traços em vermelho, microfone da fonte primária pelo número 1, falante de controle e microfone de erro (ambos localizados próximo ao assento do condutor) pelo número 2, placa de aquisição pelo número 3 (porém abaixo do assento) e computador portátil pelo número 4 (acima do banco).

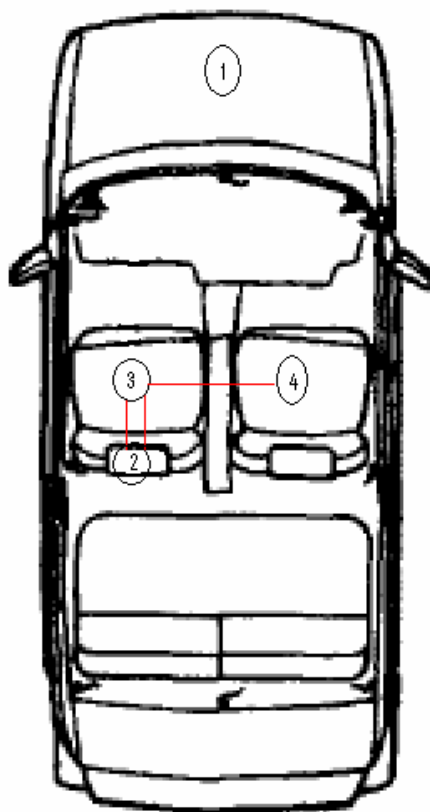


Figura 10: Esquema da montagem experimental da solução 6

3.2.4.2 Revisão bibliográfica de sistemas experimentais análogos

Antes de efetivamente construir os sistemas de controle de ruído, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre trabalhos análogos a este, para que fosse possível saber de antemão quais os resultados esperados, bem como informações relevantes à

montagem do sistema. Dois trabalhos relativos a controle global de ruído automotivo são aqui apresentados, de forma resumida.

TAMAMURA e SHIBATA (1996) apresentam em seu trabalho uma aplicação de controle ativo de ruído em um carro de 4 cilindros, utilizando um sinal de referência, 4 microfones de erro (um para cada ocupante do veículo) e 4 fontes de controle (os 4 alto-falantes presentes no carro, como mostrado na figura 11). As conclusões alcançadas pelos autores são de grande valia para esse trabalho:

- Em uma banda de baixas frequências (até 200Hz), estratégias de controle global podem ser aplicadas com sucesso, gerando extensas zonas de silêncio. Entretanto, para frequências acima desta, aumenta a dificuldade em se obter o cancelamento global de ruído, de modo que uma estratégia local de controle pode ser mais adequada;
- O uso de mais microfones de erro, quando posicionados de maneira correta, permite a obtenção de maior atenuação global de ruído;

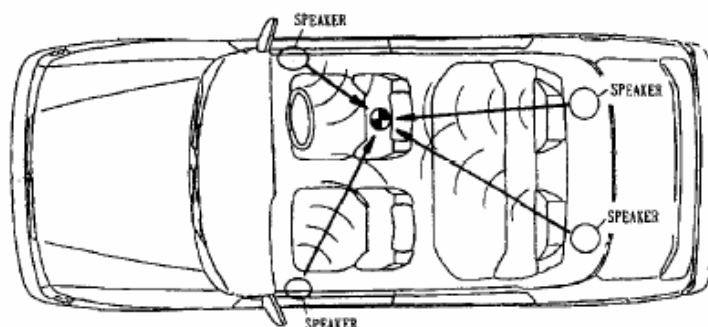


Figura 11: Montagem do sistema de controle utilizado por TAMAMURA e SHIBATA (1996)

No artigo publicado por STANEF et al (2004), é feita uma extensa análise experimental (utilizando a mesma placa de controle ativo de ruído a ser aplicada neste trabalho) e numérica (utilizando o método dos elementos finitos) da influencia da posição de microfones de erro e fontes secundárias na qualidade da atenuação do som de uma cabine de um veículo utilizado em mineração. Isso foi obtido instrumentando a

cabine com 18 microfones, 6 fontes secundárias e 5 fontes primárias, como mostrado na figura 12. As principais conclusões alcançadas pelos autores são:

- A localização das fontes de controle em relação à fonte primária é mais relevante para a atenuação de ruído global do que o número de fontes de controle utilizadas.
- O posicionamento de fontes de controle o mais próximas possível da fonte primária permite alcançar melhores resultados, como mostrado na figura 13.

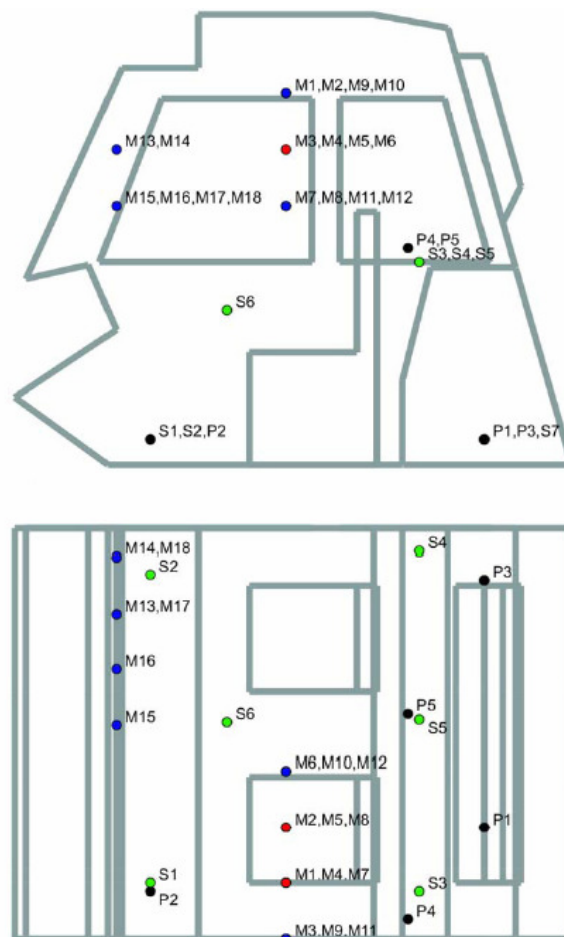


Figura 12: Instrumentação da cabine utilizada por STANEF et al (2004) em seus experimentos de controle ativo de ruído

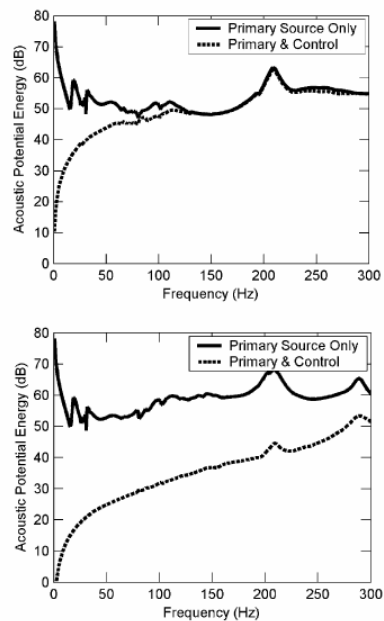


Figura 13: Resultados obtidos por STANEF et al (2004) para o ruído em um dado microfone instalado na cabine quando a fonte secundária localiza-se a $7\lambda/10$ (acima) e a $3\lambda/100$ (abaixo) da fonte primária.

3.3 Descrição do aparato experimental

3.3.1 Material utilizado

O sistema de controle ativo de ruído aqui apresentado pode ser dividido em três subsistemas: aquisição de sinais, processamento de sinais e emissão de sinal de controle. Nesse item, será descrito o material utilizado em cada subsistema, bem como seu papel no funcionamento do sistema como um todo.

3.3.1.1 Subsistema de aquisição de sinais

- Microfones:

Modelo: 4134

Marca: Brüel & Kjaer

Especificações principais:

Capacidade de medir sons de intensidade entre 14 e 162 dB

Precisão de 0,2 dB

Descrição: Os microfones serão utilizados para captação dos sinais de referência e de erro. Para o sucesso do sistema é imprescindível que essas peças apresentem elevada precisão; caso contrário, os sinais serão captados de forma distorcida e com ruído, fazendo com que o subsistema de processamento gere um sinal de controle impreciso, que pode aumentar a intensidade sonora da cabine ao invés de atenuar.

- Pré-amplificadores:

Modelo: Falcon Range ½” Microphone Preamplifier — Type 2669

Marca: Brüel & Kjaer

Especificações principais:

Alta impedância de entrada, garantindo mínima interferência no som

Descrição: As principais funções dos pré-amplificadores (e dos cabos que o ligam à fonte) são transmitir os sinais captados pelos microfones, levando-os até a fonte, e levar eletricidade aos microfones, para que possam atuar. O modelo utilizado tem diversas potencialidades, mas apenas é de interesse nesse trabalho que o pré-amplificador interfira o mínimo possível no som transmitido, o que é garantido pela alta impedância de entrada do aparelho. O conjunto formado por microfone e pré-amplificador é mostrado na figura 14.



Figura 14: Microfone e pré-amplificador utilizados no projeto

- Fonte:

Modelo: Dual Microphone Supply – Type 5935

Marca: Brüel & Kjaer

Especificações principais:

Duas entradas tipo “7-pin socket” para os microfones

Duas saídas tipo BNC para o sistema de controle ativo de ruído

Alimentação: 3 pilhas alcalinas tipo “D” de 1,5 V

Descrição: A fonte fornece energia aos pré-amplificadores. O modelo utilizado tem duas entradas e duas saídas, exatamente o necessário para receber e transmitir os sinais de erro e de referência, e é alimentado com pilhas, o que é útil no caso em questão, dada a dificuldade de se ter acesso à rede elétrica dentro da cabine de um automóvel. A fonte utilizada é mostrada na figura 15.



Figura 15: Fonte utilizada no projeto

3.3.1.2 Subsistema de processamento de sinais

- Placa de controle ativo:

Modelo: EZ-ANC

Marca: Causal systems

Especificações principais:

Alimentação de entrada: 5V / 12V

Possibilidade de conexão de 5 entradas de erro (conectores BNC)

Possibilidade de conexão de 6 saídas de controle (conectores BNC)

Possibilidade de conexão de 1 sinal de referência (conector BNC)

Saída tipo DB9 para PC

Descrição: A placa de controle utilizada apresenta algoritmos prontos para efetuar o cancelamento do ruído, sendo necessário apenas ajustar parâmetros numéricos para otimizar a ação de controle. Isso é feito em um computador (no caso, um notebook), que recebe as informações da placa e as apresenta em uma interface gráfica, fazendo uso via porta serial de um software presente na própria placa.

- Notebook:

Modelo: Aspire 3100-1464

Marca: Acer

Especificações principais:

Entrada tipo DB9 para receber dados da placa de controle

Software “Kermit” instalado

Descrição: Por meio do software “Kermit”, o notebook consegue acessar (via porta serial) as informações provenientes da placa de controle, bem como um software interno para variação dos parâmetros numéricos necessários. É assim que são captados os níveis sonoros nos microfones, os quais são utilizados para mensurar a eficácia do controle utilizado. A figura 16 apresenta uma ilustração do notebook utilizado.



Figura 16: Notebook utilizado para acesso a informações da placa ANC

- Circuito regulador de tensão:

Modelo: -

Marca: -

Especificações principais:

Redução de tensão de 12V para 5V

Proteção contra oscilação de tensão.

Descrição: O fato de o experimento se passar em uma cabine automotiva (sem conexão com a rede elétrica, portanto) faz com que a alimentação recomendada – uso de um plug de quatro parafusos, semelhante ao utilizado por PCs e seus periféricos, com entradas 12V, neutro, neutro e 5V – não possa ser utilizada aqui. Dessa forma, foi montado um circuito que permite obter 5V a partir de uma bateria de 12V, de modo a ser possível fornecer à placa 12V e 5V simultaneamente. O circuito montado é mostrado na figura 17, e uma representação esquemática do mesmo é mostrada na figura 18.

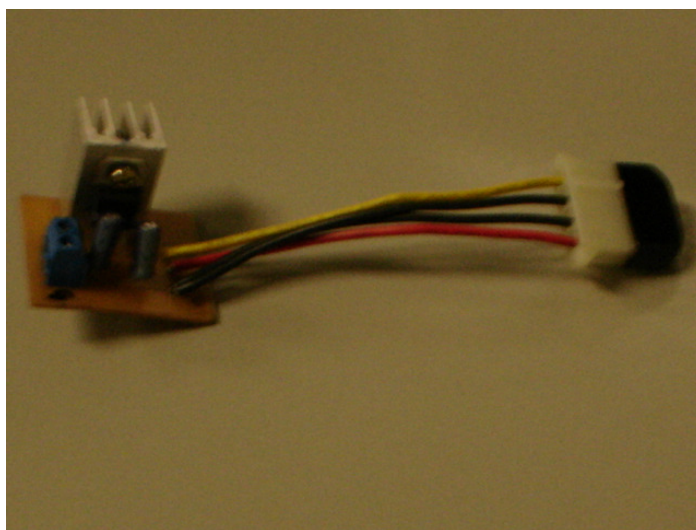


Figura 17: Circuito montado para regular a tensão de alimentação da placa de controle

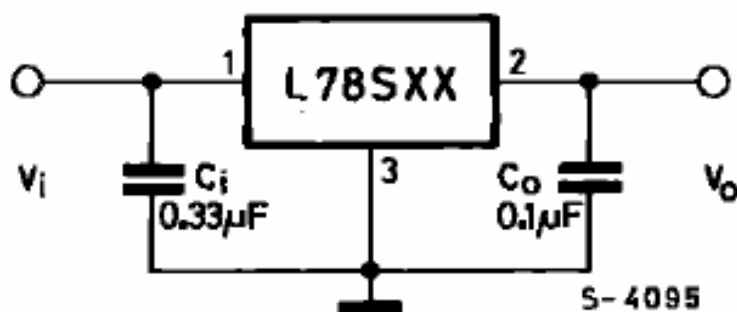


Figura 18: Representação esquemática do circuito montado

3.3.1.3 Subsistema de transporte de sinal de controle e emissão de som secundário

- Sistema de som automotivo:

Modelo: KD-G289UR

Marca: JVC

Especificações principais:

Entrada para fonte sonora externa

Dois alto-falantes localizados nas portas dianteiras do veículo

Descrição: O sistema de som automotivo utilizado já estava instalado no automóvel quando da execução desse trabalho. Ele dispõe de uma entrada de sinal externo, a qual permite que o sinal emitido pela placa de controle ativo seja transformado em som nos falantes do automóvel. A figura 19 mostra o comando do sistema de som, com destaque para a entrada auxiliar.



Figura 19: Comando do sistema de som automotivo utilizado

- Caixas de som:

Modelo: SPK698USBP

Marca: Mtek

Especificações principais:

Plug USB para conexão com computador

180W de potência

Alimentação pela conexão USB

Descrição: As caixas de som utilizadas têm saída USB para conexão no notebook, de modo que não requerem ligação externa. Quanto ao sinal de controle, ele é recebido da seguinte forma: sua entrada é conectada na saída do notebook, o qual recebe o sinal de saída da placa de controle ativo. A figura 20 apresenta as caixas utilizadas.



Figura 20: Caixas de som utilizadas para controle de ruído

4. RESULTADOS

As seguintes condições foram seguidas na execução dos testes:

- Para que fosse possível manter a rotação do motor constante, o veículo foi mantido parado e em ponto morto, ou seja, a aproximadamente 1000 rpm; isso também eliminou a influência do ruído emitido pelo contato entre pneu e solo quando de seu movimento relativo, permitindo apenas o cancelamento do ruído do motor propriamente dito.
- Os experimentos foram executados com as três portas do automóvel e os vidros fechados, à exceção de uma pequena fresta no vidro dianteiro direito para a passagem do microfone de referência, o qual foi mantido suspenso próximo ao motor, com o capô do carro aberto.

Os testes em campo foram conduzidos variando-se 5 parâmetros do sistema de controle:

- Número de coeficientes do filtro digital
- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo
- *Leakage factor* do algoritmo adaptativo
- Coeficiente de convergência da estimativa do caminho secundário
- *Leakage factor* da estimativa do caminho secundário

Entretanto, a variação dos coeficientes de convergência e do *leakage factor* da estimativa do caminho secundário não alteraram drasticamente os efeitos causados pelo sistema de controle ativo, e não foi possível variar em larga escala os valores do *leakage factor* do algoritmo adaptativo, pois o sistema tornava-se instável e não convergia. Dessa forma, o sistema foi testado com esse fator igual a 4 e, em seguida, igual a 8, com resultados próximos.

Dessa forma, os resultados aqui apresentados estão em função de três parâmetros: da solução implementada, do número de coeficientes do filtro digital e do coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo.

4.1 Resultados para a solução 5 – controle utilizando sistema de som do automóvel

4.1.1 Configuração 1

A primeira configuração testada subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 35
- Número de coeficientes do filtro digital: 60

Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 21, podemos identificar uma região de predominância de atenuação de ruído entre 0 e 170 Hz. Dentro dessa região, observamos algumas poucas regiões em que há aumento de ruído, mas sempre na casa de 2-3 dB, enquanto a atenuação máxima chega a 10 dB por volta de 115 Hz (considerando que os valores de pressão sonora com controle por volta de 300 e 400 Hz, que explodem para valores negativos, possam ser desconsiderados). A partir de 170 Hz, passa a não haver mais uma distinção clara de zonas de aumento ou redução de ruído, com tais resultados se alternando.

Integrando as curvas expostas na figura 21, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos, igual a 14,1 dB para ambos os casos. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado não altera a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral, apesar de diminuí-la em regiões de baixas frequências.

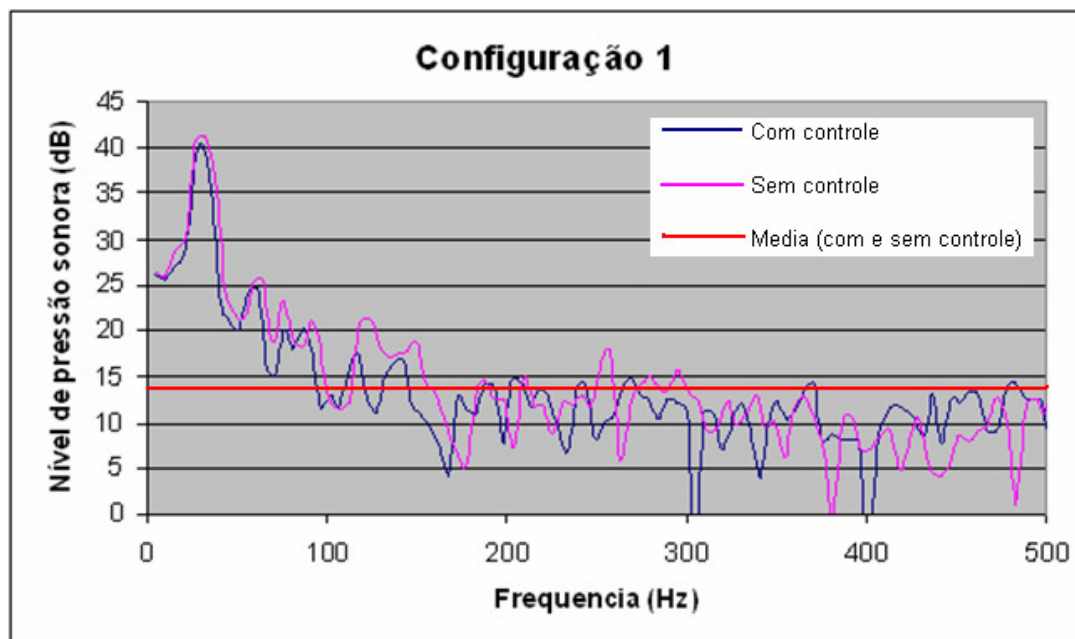


Figura 21: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 1.

4.1.2 Configuração 2

A segunda configuração testada subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 75
- Número de coeficientes do filtro digital: 60

Aqui, o que foi feito foi aumentar o coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo, mantendo um filtro de mesma extensão. Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 22, a região de predominância de atenuação de ruído agora situa-se entre 0 e 135 Hz, à qual segue-se uma pequena zona de amplificação de ruído, entre 135 e 210 Hz. A partir de 210 Hz, novamente não há mais distinção clara entre zonas de aumento ou redução de ruído, com tais resultados se alternando. A atenuação máxima verificada se dá novamente em torno de 115 Hz, com 9 dB de redução de ruído.

Integrando as curvas expostas na figura 22, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 14,7 dB para o caso sem controle e 14,4 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 1,8%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral e, mais especificamente, em regiões de baixas frequências.

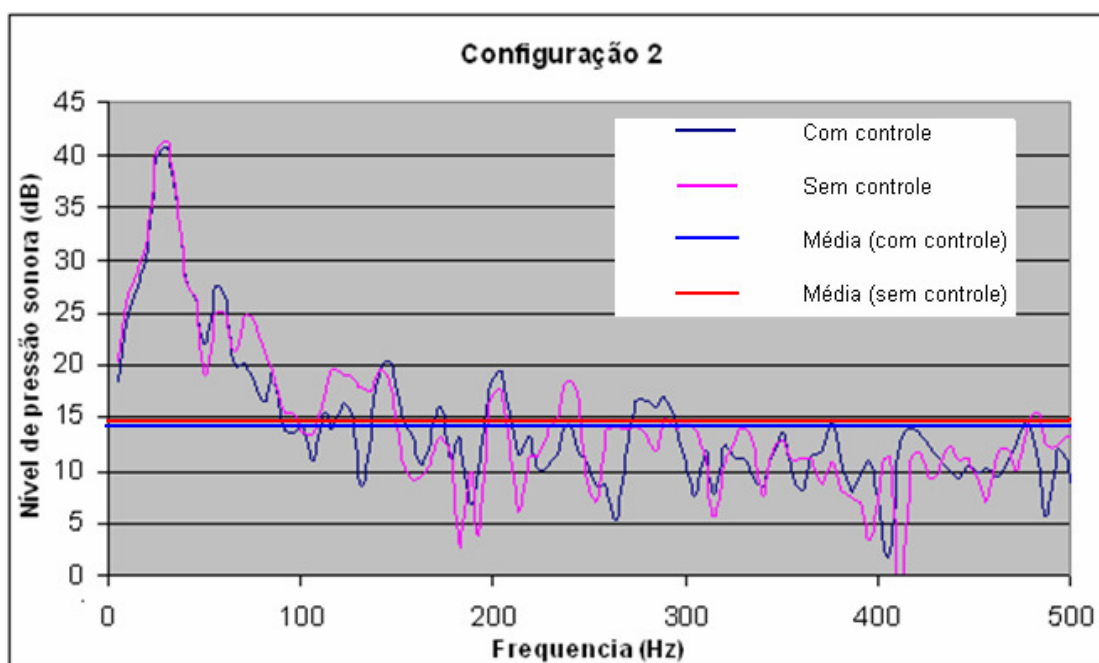


Figura 22: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 2.

4.1.3 Configuração 3

A terceira configuração testada subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 10
- Número de coeficientes do filtro digital: 60

Nessa configuração, foi diminuído o coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo, ainda mantendo um filtro de mesma extensão. Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 23, a região de predominância de atenuação de ruído situa-se entre 0 e 180 Hz, mas há agora outras pequenas regiões acima desse valor de frequência nas quais também se verifica atenuação, como entre 210 e 240 Hz, entre 255 e 300 Hz e entre 350 e 380 Hz . Apesar de se manter elevada a atenuação na faixa de 115 Hz (6 dB), a maior redução de ruído se dá na faixa de 80 Hz, com aproximadamente 15 dB de redução. Entretanto, não é possível atestar a confiabilidade desse dado.

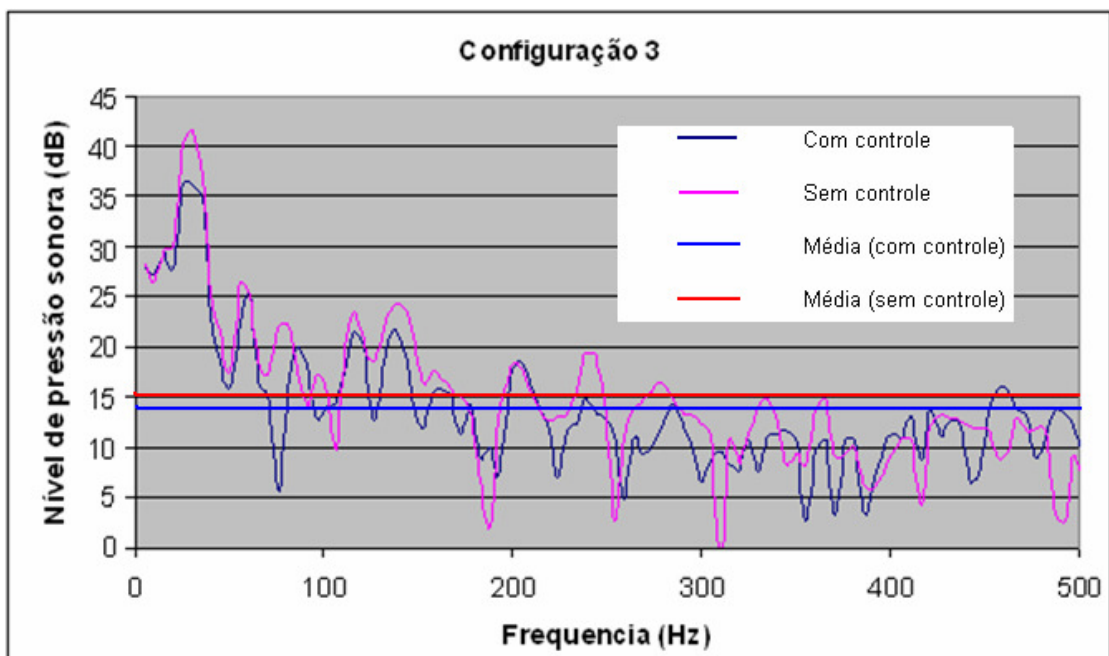


Figura 23: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 3.

Integrando as curvas expostas na figura 23, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 15,1 dB para o caso sem controle 14,2 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 5,5%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral e, mais especificamente, em regiões de baixas frequências.

4.1.4 Configuração 4

A quarta configuração testada subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 35
- Número de coeficientes do filtro digital: 20

Nessa configuração, retornou-se a um valor de coeficiente de convergência intermediário, mas a extensão do filtro foi diminuída. Os gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 27 mostram redução de ruído em uma região de predominância de atenuação sonora entre 0 e 135 Hz, e tendência de aumento no nível de pressão sonora após 135 Hz, apesar de alguns focos de atenuação. A maior atenuação volta a ocorrer por volta de 115-125 Hz, com redução da ordem de 7 dB.

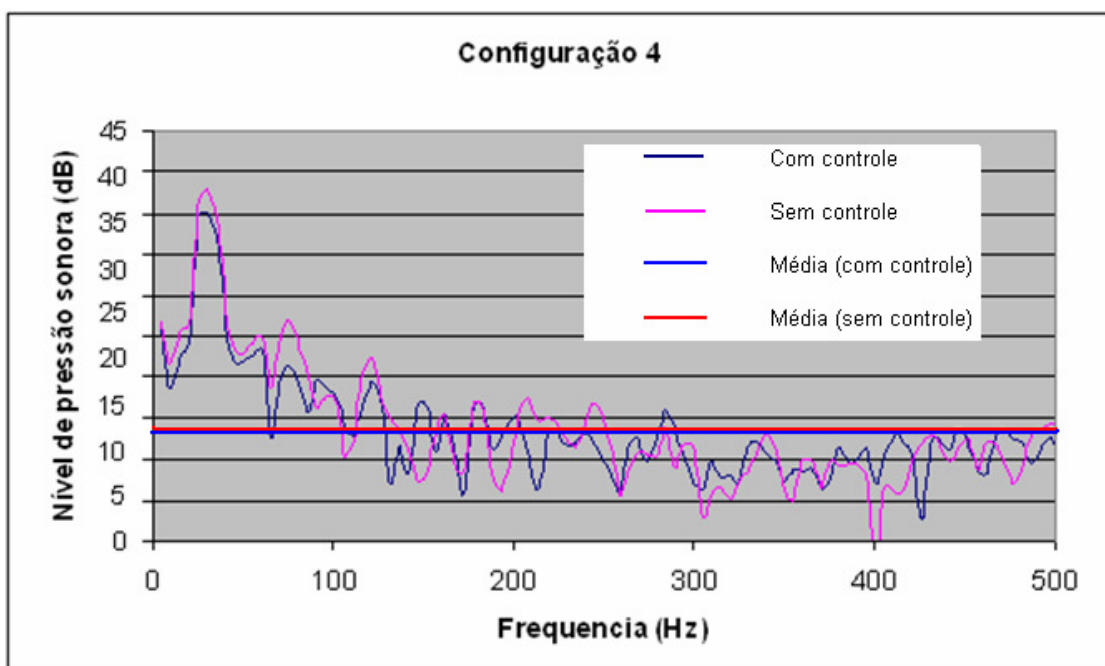


Figura 24: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 4.

Integrando as curvas expostas na figura 24, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 13,9 dB para o caso sem controle e 13,8 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 0,85%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora não apenas em regiões de baixas frequências, mas também no espectro estudado de maneira geral, ainda que em magnitude muito pequena.

4.1.5 Configuração 5

A quinta configuração testada foi a última experimentada para a solução 5. Ela subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 10
- Número de coeficientes do filtro digital: 20

Nessa configuração, experimentou-se um valor menor de coeficiente de convergência para o filtro de menor extensão. Os gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 25 mostram uma extensa zona de atenuação de ruído entre 0 e 185 Hz, seguida por outra extensa região, porém de notável amplificação sonora, entre 185 e 400 Hz. A máxima atenuação se dá em 165 Hz, com 9 dB de redução sonora.

Integrando as curvas expostas na figura 25, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 15,1 dB para o caso sem controle e 15 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 0,85%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora não apenas em regiões de baixas frequências, mas também no espectro estudado de maneira geral, ainda que em magnitude muito pequena.

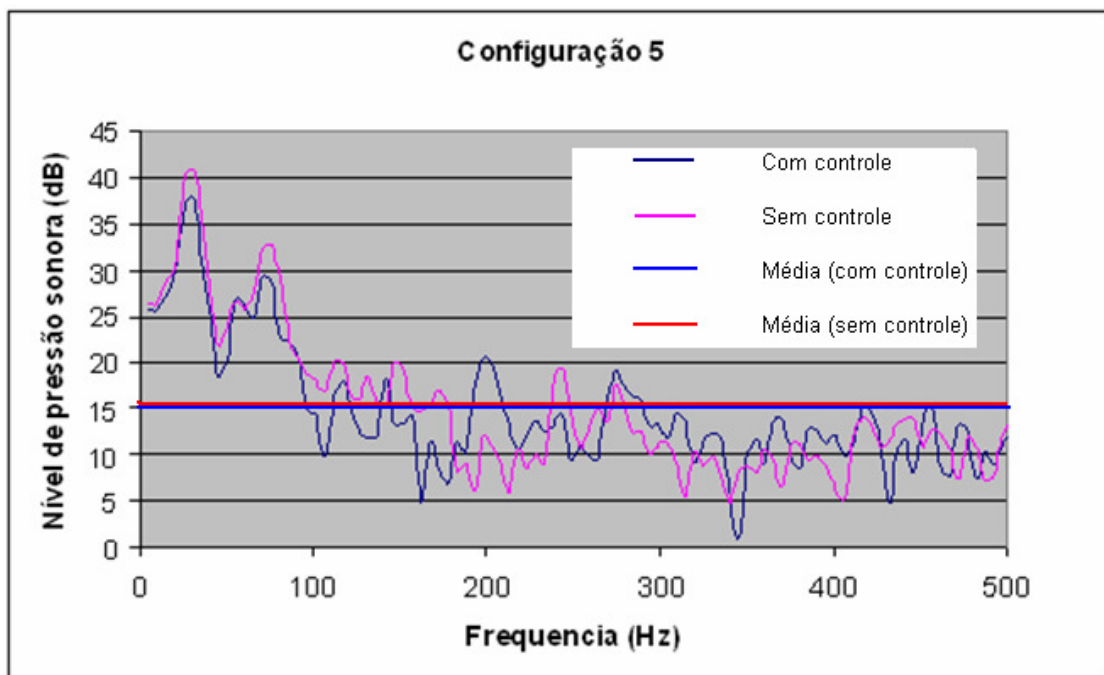


Figura 25: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 5.

4.2 Resultados para a solução 6 – controle local próximo aos ouvidos do condutor

4.2.1 Configuração 6

A primeira configuração testada para a solução 6 (sexta configuração no geral) subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 10
- Número de coeficientes do filtro digital: 60

Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 26, podemos identificar uma região onde apenas há atenuação de ruído, entre 0 e 140 Hz. Após essa frequência, observamos alternância entre regiões de aumento e redução de ruído, havendo duas zonas de predominância de redução de ruído e uma zona

de predominância de amplificação de ruído. A máxima atenuação se dá na faixa de 95 Hz, com aproximadamente 6 dB de redução de ruído.

Integrando as curvas expostas na figura 26, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 17,2 dB para o caso sem controle e 16,5 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 4%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral e, mais especificamente, em regiões de baixas frequências.

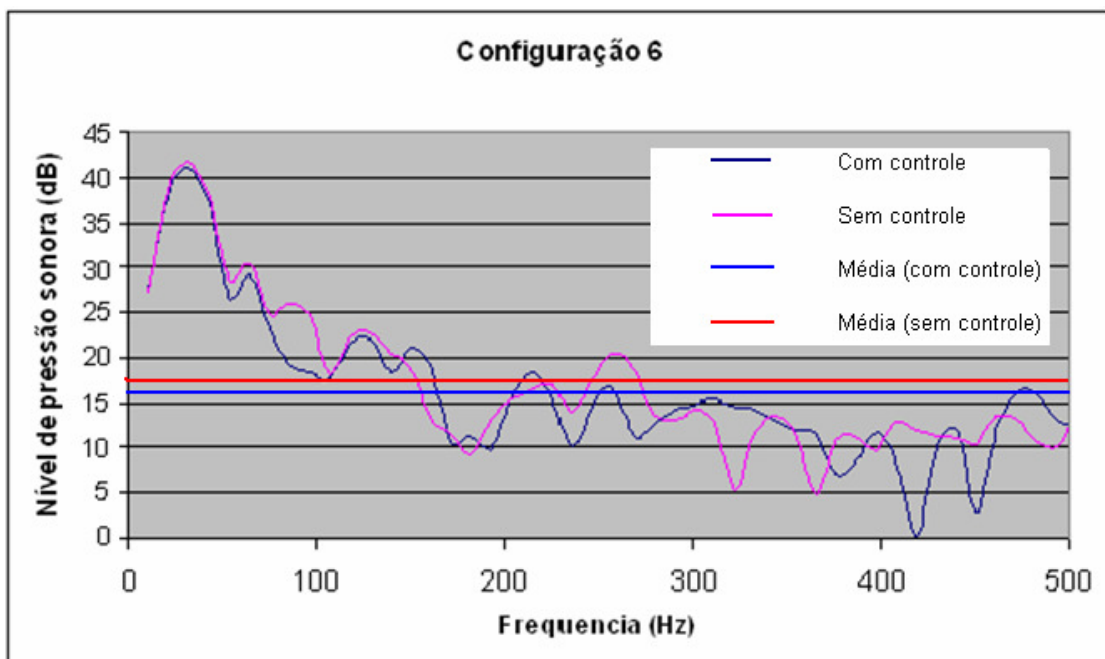


Figura 26: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 6.

4.2.2 Configuração 7

A segunda configuração testada para a solução 6 (sétima configuração no geral) subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 35
- Número de coeficientes do filtro digital: 60

O que foi mudado da configuração anterior para esta foi o aumento do coeficiente de convergência. Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 27, identificamos uma curta região de atenuação de ruído entre 0 e 105 Hz, após a qual observamos alternância entre regiões de aumento e redução de ruído. A máxima atenuação se dá por volta de 75 Hz, com 11 dB de redução.

Integrando as curvas expostas na figura 27, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 19,1 dB para o caso sem controle e 18,9 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 0,93%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado diminui a intensidade sonora não apenas em regiões de baixas frequências, mas também no espectro estudado de maneira geral, ainda que em magnitude muito pequena.

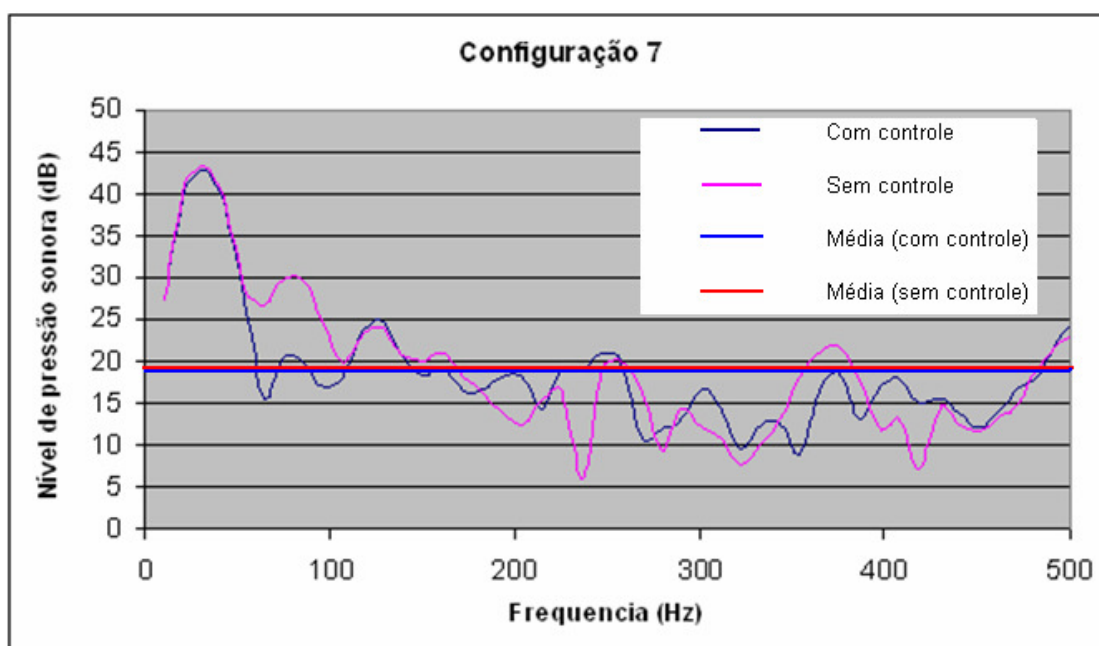


Figura 27: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 7.

4.2.3 Configuração 8

A terceira configuração testada para a solução 6 (oitava configuração no geral) subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 10
- Número de coeficientes do filtro digital: 20

Nessa configuração, se trabalha com menores valores de coeficiente de convergência e menor número de coeficientes do filtro digital. Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 28, identificamos uma curta região de atenuação de ruído, entre 0 e 95 Hz, após a qual observamos alternância entre pequenas regiões de aumento e redução de ruído. A máxima atenuação se dá por volta de 260 Hz, com 6 dB de redução.

Integrando as curvas expostas na figura 28, podemos obter uma média da intensidade sonora no espectro para os dois casos: 16 dB para o caso sem controle e 16,3 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 1,4%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado aumenta a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral, apesar de diminuí-la em regiões de baixas frequências.

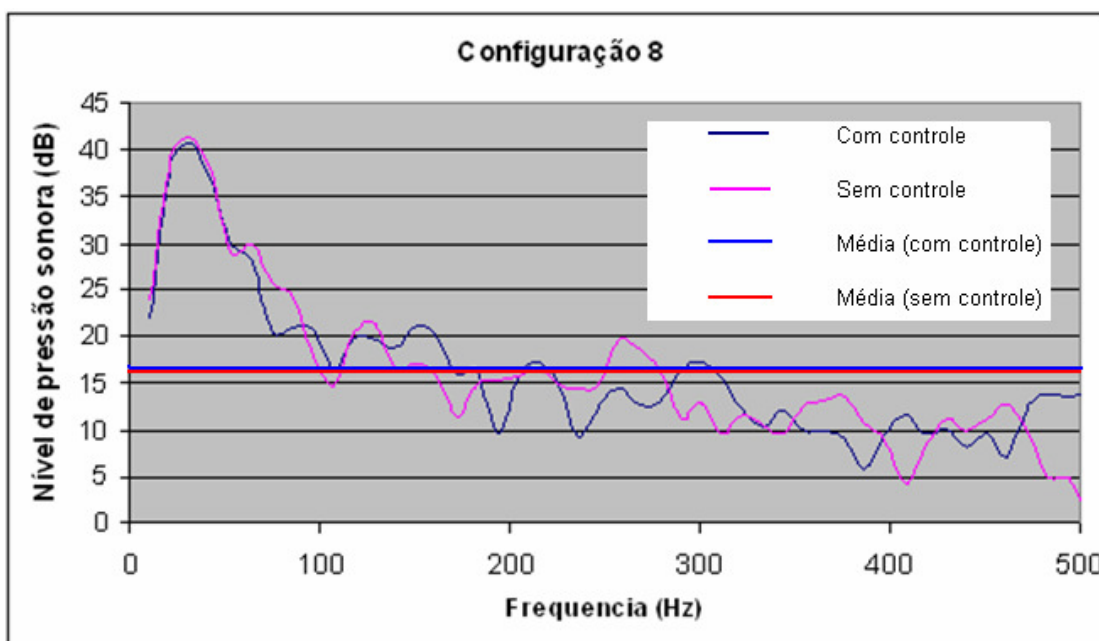


Figura 28: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 8.

4.2.4 Configuração 9

A quarta e última configuração testada para a solução 6 (nona configuração no geral) subentendia os seguintes parâmetros:

- Coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo: 35
- Número de coeficientes do filtro digital: 20

Nessa última configuração, aumentamos o valor do coeficiente de convergência, mantendo o número de coeficientes do filtro. Pelos gráficos de intensidade sonora em função da frequência apresentados na figura 29, identificamos uma região de atenuação de ruído, entre 0 e 120 Hz, que apresenta diversos pontos de aumento do nível sonoro. Após 120 Hz, observamos predomínio de regiões de aumento de ruído, com alguns focos de frequências em que o controle é satisfatório. A máxima atenuação se dá em 95 Hz, com 7 dB de redução.

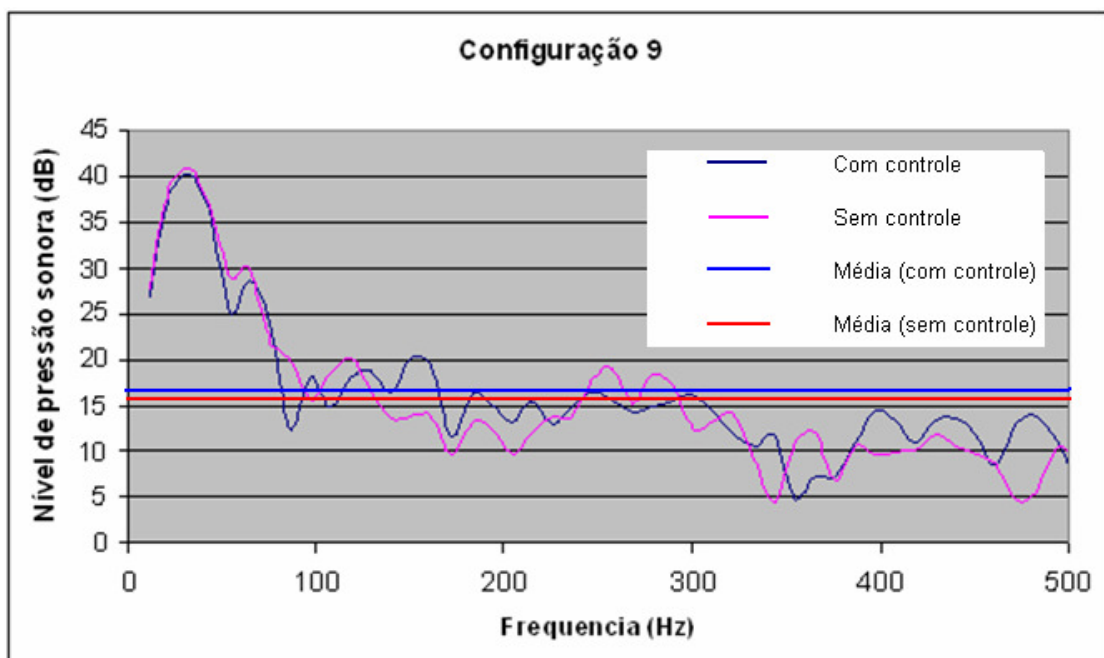


Figura 29: Nível de pressão sonora em função da frequência para a configuração 9.

Integrando as curvas expostas na figura 29, podemos obter uma média da intensidade sonora em todo o espectro para os dois casos: 15,5 dB para o caso sem controle e 16,3 dB para o caso com controle, resultando numa diferença de 4,7%. Dessa forma, verifica-se que o controle aplicado aumenta a intensidade sonora no espectro estudado de maneira geral, apesar de diminuí-la em regiões de baixas frequências.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Antes de se tirar quaisquer conclusões acerca dos resultados obtidos, deve-se levar em conta o fato de ambas as soluções utilizarem dispositivos emissores de som secundário que não respondem em frequências abaixo de um certo valor (80 Hz no caso das caixas de som, 50 Hz no caso dos falantes do automóvel). Assim, as atenuações notadas nos picos de 20 Hz para as configurações 3, 4 e 5 não devem ser consideradas como resultado de uma ação de controle efetiva, visto que seria impossível produzir anti-ruídos de tal frequência usando o equipamento de que se dispunha. Para frequências acima das citadas acima, entretanto, o funcionamento dos dispositivos de emissão de anti-ruído passa a ser válido, e os resultados são confiáveis, pois todos os dispositivos de medição sonora e a placa de controle apresentam erros de precisão que não ultrapassam a casa de 0,5 dB.

Observadas as colocações do último parágrafo, os resultados obtidos e apresentados no capítulo anterior nos levam a três conclusões principais; a primeira é o efeito positivo na ação de controle que tiveram as configurações com maior número de coeficientes dos filtros digitais e menores valores de coeficiente de convergência dos algoritmos adaptativos. No que diz respeito à extensão do filtro digital, não há, em teoria, relação entre o aumento do número de coeficientes do filtro e uma melhora no controle ativo do ruído. Na verdade, a técnica sugerida para variação desse parâmetro é tentativa e erro (SNYDER;VOKALEK, 1994). Quanto ao coeficiente de convergência do algoritmo adaptativo, pode-se explicar melhores resultados para menores valores pelo fato de que valores elevados tendem a não manter uma determinada configuração de valores dos filtros, sempre buscando novos valores a cada iteração. Dessa forma, o

algoritmo torna-se instável, não convergindo para um conjunto de valores ótimos para o filtro digital. Com valores menores, ao contrário, é obtida maior estabilidade.

A segunda conclusão que se tira é a maior eficácia do controle realizado pelos falantes do automóvel em relação ao controle local. Isso pode ser explicado pelo fato de que o sistema de som do automóvel é um dispositivo de maior potência e qualidade do que as pequenas caixas acústicas utilizadas para controle local. De fato, alto-falantes comuns (nessa categoria também inclusas caixas de som) são fracos em respostas abaixo de 100 Hz – justamente as mais importantes no caso em questão.

Finalmente, a terceira conclusão que pode se obter é, na verdade, a corroboração de algo que a literatura especializada atesta periodicamente: no caso automotivo, quanto maior a rotação do motor (e, conseqüentemente, a frequência do ruído que se deseja reduzir), maior a eficácia das técnicas de controle ativo. A figura 30 apresenta o resultado do controle ativo em automóveis com motor de quatro cilindros em linha, para a posição do motorista (também sob análise no presente trabalho), sendo obtidos resultados expressivos de redução de ruído apenas acima de 3500 rpm.

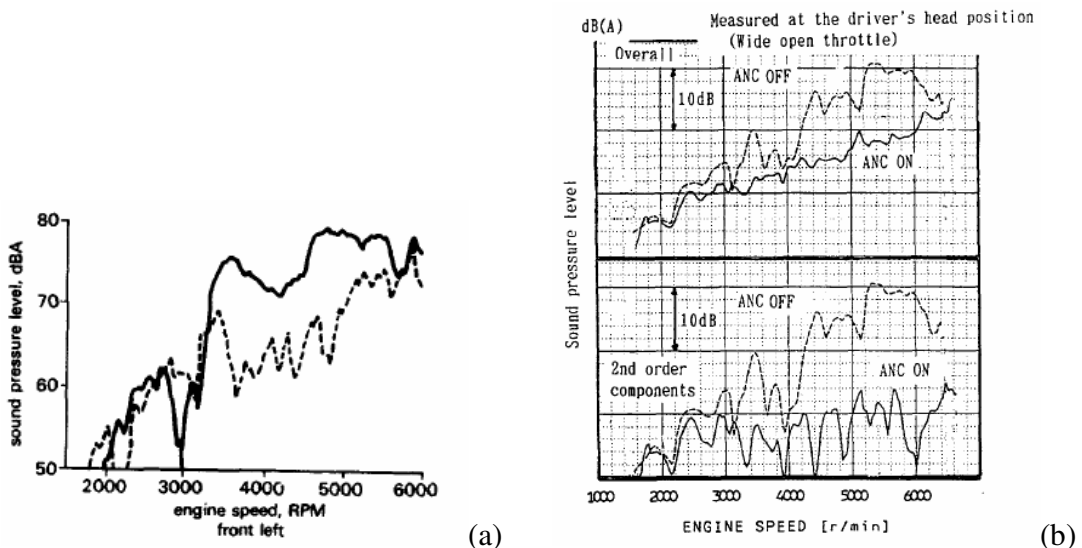


Figura 30: Resultados de controle ativo de ruído em um veículo de 4 cilindros em linha, na posição do condutor. (a) (PERRY, 1989 apud ELLIOTT, 1993) e (b) (TAMAMURA; SHIBATA, 1995).

6. CONCLUSÕES

Ao longo de aproximadamente 18 meses, um sistema de controle ativo de ruído com aplicação automotiva foi elaborado, tendo como foco especificamente a posição do condutor do veículo. Foram desenvolvidas as etapas de revisão bibliográfica básica, para assimilação dos fundamentos da tecnologia e do estado da arte na área, proposição de soluções iniciais, aprofundamento em bibliografia mais técnica e específica, decisão das soluções finais, a partir dos conhecimentos então dominados pelo autor, levantamento de materiais e busca (fracassada) de apoio financeiro para implantação das soluções finais, montagem do sistema, condução dos experimentos e análise dos resultados. Cada uma dessas etapas tem conclusões interessantes a serem abordadas.

A revisão bibliográfica básica conduzida tornou clara a complexidade e interdisciplinaridade do tema. Assuntos tão diversos como processamento de sinais e acústica são trabalhados em conjunto, sempre havendo interferência entre os temas. Deve-se ressaltar que, apesar da bibliografia ser vasta tanto nas áreas de forma isolada como no controle ativo de ruído propriamente dito, infelizmente é pouca a disponibilidade de publicações nacionais sobre o tema. Isso dificulta o trabalho de quem ingressa na área e afirma o atraso do Brasil num tema de potencial aplicação automotiva, em um país cujo principal meio de transporte e um dos maiores sonhos de consumo é o automóvel. Ainda assim, há trabalhos brasileiros honrosos sobre o tema, os quais estão listados nas referências.

A proposição de soluções iniciais foi um excelente exercício de *brainstorm*. De todas as idéias cogitadas, viáveis ou não, chegou-se a quatro alternativas iniciais, as quais, por conta das limitações de um trabalho de formatura, tiveram de ser adaptadas e reformuladas na forma de soluções de implantação mais simples. Essas novas soluções são, sem dúvida, respostas eficazes para redução do ruído automotivo.

A mais imediata das duas soluções é o uso do próprio sistema de som do automóvel – o que já é feito em modelos japoneses, convém lembrar. Ela é economicamente viável, visto que se utiliza de algo que o consumidor já se mostra disposto a pagar, que são as caixas de som vinculadas ao rádio. Sua utilização em

conjunto com uma boa placa de controle ativo, calibrada para diversas situações e desenvolvida por uma equipe especializada, apresenta potencial para redução de ruído de forma global, sendo útil para todos os passageiros e funcionando como elemento de segurança e conforto no veículo.

A outra solução – o controle local – requer ainda bastante engenharia para ser implantada, mas se mostra eficaz em usos análogos ao que teria em automóveis. Nesse caso, as fontes de controle requerem menor potência e apresentam uma capacidade de atenuação maior do que no caso de controle global, justamente por poder ser direcionada para a redução de ruído em uma zona muito menor.

Os resultados obtidos nesse trabalho parcialmente corroboram as perspectivas expostas acima. O controle utilizando o sistema de som do automóvel consegue cancelamento de ruído em largas faixas de frequência, mesmo sem uma calibração ideal e em condições adversas (baixa rpm, fios e cabos de transmissão de sinais de qualidade inferior, etc.). Experimentos em rotações mais elevadas e com o veículo em movimento, bem como considerando conversa entre passageiros e música ambiente, devem ser realizados para permitir uma análise mais completa do funcionamento do método nas condições reais de uso. Por sua vez, o controle local utilizando caixas de som próximas aos ouvidos do condutor apresentou resultados piores, mas compatíveis com a qualidade das caixas utilizadas; experimentos mais estruturados devem ser feitos a fim de atestarem com precisão a capacidade desse método.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BISTAFA, S.R., **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Ed. Blucher, São Paulo, 2006.

ELLIOTT, S.J.; NELSON, P.A. **Active noise control**. IEEE Signal Processing Magazine, vol.10, pp.12-35, 1993.

HANSEN, C.H. **Does active noise control have a future?**. Wespac 8: The 8th western Pacific acoustic conference, acoustics on the move, Melbourne, 2003.

KUO, B.C. **Digital control systems**. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1980

KUO, S.M.; MORGAN, D.R. **Active Noise Control: A Tutorial Review**. Proceedings of The IEEE, vol. 87, no. 6, 1999

MASIERO. **Controle ativo de ruído para transformadores de potência em campo**. 162 p. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MORAES, L.F.M.; DOMINGUES, G. M. B. **Relatório Técnico Ravel/01-96**. Redes Digitais de Serviços Integrados, Ravel-UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.

NELSON, P.A.; ELLIOTT, S.J. **Active control of sound**. Academic Press, London, 1992.

PECENIN, M. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição e análise de sinais elétricos de tensão em tempo real com suporte de ferramentas de software livre**. 48p. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2005.

SNYDER, S.D; VOKALEK, G. **EZ-ANC User's Guide**. Guia de usuário do sistema de controle ativo de ruído EZ-ANC. Causal Systems Pty Ltd., Adelaide, 1994.

STANEF, D.A.; HANSEN, C.H.; MORGANS, R.C. **Active control analysis of mining vehicle cabin noise using finite element modelling.** Journal of Sound and Vibration, vol. 277, pp. 277-297, 2004.

TAMAMURA, M.; SHIBATA, E. **Application of active noise control for engine related cabin noise.** JSAE Review, vol. 17, pp. 37-43, 1996.