

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA

**METODOLOGIA DAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE
ÁUDIO PARA AUTOMÓVEIS DE PASSEIO: UM ESTUDO DE CASO**

São Caetano do Sul 2012

JOSÉ EDUARDO SANTINONI FREIRE

**METODOLOGIA DAS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE
ÁUDIO PARA AUTOMÓVEIS DE PASSEIO: UM ESTUDO DE CASO.**

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Automotiva, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Júlio César Lucchi

São Caetano do Sul

2012

Freire, José

Metodologia das etapas de desenvolvimento de sistemas de áudio para automóveis de passeio: um estudo de caso / José Eduardo Santinoni Freire. São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2012.

43p.

Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) — Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2012.

1. Áudio 2. Sistema de som automotivo 3. Alto-falantes 4. Equalização em veículo 5. Distorção 6. Frequência 7. Agudos 8. Graves I. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. II. Título.

RESUMO

Este trabalho apresenta o processo de desenvolvimento de um sistema de áudio para automóveis de passeio, sob o ponto de vista e necessidades do Engenheiro de uma montadora. Mostra desde a conceituação sobre sistemas de áudio, passando pela especificação de componentes até chegar à avaliação do sistema como um todo no veículo. Problemas encontrados e possíveis causas e soluções também são discutidos. Tudo isso será de grande valia para profissionais da área e em especial para os ingressantes em atividades com esse sistema, visto sua crescente demanda mercadológica. Outro ponto que ressalta a importância desse trabalho é que não se formam engenheiros de áudio nas universidades e nem mesmo é comum haver cursos de especialização nessa área, portanto a experiência acaba sendo o fator mais relevante para obtenção de bons resultados.

Palavras-chave: Áudio. Sistema de som automotivo. Alto-falantes. Equalização em veículo. Distorção. Frequência. Agudos. Graves.

ABSTRACT

This paper presents the development process of an audio system for passenger cars considering the needs of the Automaker Engineer. It shows basics system content, components specifications, until final vehicle evaluation. Possible issues and their causes, besides feasible solutions are also discussed. All of this can be useful for professionals engaged in this area, especially for the beginners with this kind of system, since it is an area in exponential growing in the market. Another important point of view is that there is no Audio Engineer professionals being trained in the universities, as well it is rare a specific course in this area, therefore the personal experience is the main point to get good results.

Keywords: Audio. Automotive sound system. Speakers. Vehicle equalization. Distortion. Frequency. Treble. Bass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	Composição do alto-falante	12
FIGURA 2 -	Campo assimétrico	13
FIGURA 3 -	Campo simétrico	14
FIGURA 4-	Curva massa de ar x curva massa do cone	15
FIGURA 5 -	Curva resultante da soma das curvas de ar e cone	15
QUADRO 1 -	Equivalência entre sistemas mecânicos e elétricos	18
FIGURA 6 -	Esquema do circuito elétrico	18
FIGURA 7 -	Exemplo de alto-falantes localizados no <i>dash</i>	26
FIGURA 8 -	Exemplo de alto-falante na coluna A	27
FIGURA 9 -	Exemplo de falante instalado no <i>kickpad</i>	28
FIGURA 10 -	Exemplo de falante instalado no porta pacotes	29
FIGURA 11 -	Foto da coluna B de veículo	30
FIGURA 12 -	Exemplo de circuito de <i>cross-over</i>	33
FIGURA 13 -	Curva de audibilidade	38

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	CONCEITOS BÁSICOS	10
2.1.	O SOM	10
2.2.	dB's	10
2.3.	WATTS	10
2.4.	SPL	11
3.	COMPONENTES DO SISTEMA DE ÁUDIO AUTOMOTIVO	12
3.1.	MÍDIA REPRODUTORA	12
3.2.	ALTO-FALANTES	12
3.2.1.	Teoria	12
3.2.2.	O sistema motor	13
3.2.3.	O diafragma	14
3.2.4.	O sistema de suspensão	17
3.2.5.	Modelo elétrico do alto falante	17
3.2.6.	Especificações do alto-falante	19
3.2.6.1.	Resposta em frequência	19
3.2.6.2.	Power compression	20
3.2.6.3.	Distorção harmônica	20
3.2.6.4.	Distorção de graves	21
3.2.6.5.	Curvas de impedância	21
3.2.7.	Especificação x problemas do alto-falante	21
3.2.7.1.	Sensibilidade	21
3.2.7.2.	Resposta em frequência	22
3.2.7.3.	Frequência de ressonância	22
3.2.7.4.	Power compression	22
3.2.7.5.	Distorção de graves	22
3.2.7.6.	Ruídos estranhos (squeaks and rattles)	22
3.3.	ESCOLHA DO TIPO E LOCALIZAÇÃO DOS ALTO-FALANTES NO AUTOMÓVEL	23
3.3.1.	Tipos de alto-falantes	23
3.3.1.1.	Full-range	23
3.3.1.2.	Woofer	23
3.3.1.3.	Extended range	23
3.3.1.4.	Coaxial	24
3.3.1.5.	Off-axial	24

3.3.1.6.	Tweeter	24
3.3.1.7.	Sub-woofer.....	24
3.3.1.8.	High clarity	24
3.3.2.	Localização dos alto-falantes e escolha do tipo	24
3.3.3.	Alto-falantes dianteiros	25
3.3.3.1.	Portas dianteiras	26
3.3.3.2.	Dash	26
3.3.3.3.	Coluna A	27
3.3.3.4.	Kickpad	28
3.3.4.	Alto-falantes traseiros	28
3.3.4.1.	Porta pacotes	28
3.3.4.2.	Portas traseiras	29
3.3.4.3.	Colunas “B”	29
3.3.4.4.	Tampa traseira	30
3.4.	NOÇÕES BÁSICAS DE CAIXAS ACÚSTICAS	30
3.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MONTAGEM DOS ALTO-FALANTES NO AUTOMÓVEL	32
4.	FILTROS, <i>CROSS-OVERS</i> E AMPLIFICADORES	33
4.1.	FILTROS E CROSS-OVERS	33
4.2.	AMPLIFICADORES INTERNOS À MÍDIA REPRODUTORA.....	33
4.3.	AMPLIFICADORES EXTERNOS À MÍDIA REPRODUTORA.....	34
4.4.	ESPECIFICAÇÃO DO AMPLIFICADOR	34
5.	EQUALIZAÇÃO DO SOM NO AUTOMÓVEL	36
5.1.	COMO MEDIR O RESULTADO FINAL	39
6.	CONCLUSÃO	40
7.	REFERÊNCIAS	41
7.1.	OUTRAS REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A - PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE AM E FM	43
A.1.	PROPAGAÇÃO DO AM	43
A.2.	PROPAGAÇÃO DO FM	44
A.3.	<i>MULTIPATH</i>	45
A.4.	<i>OVERLOAD</i> OU SOBRECARGA.....	45
A.5.	<i>FRINGE</i>	46

1. INTRODUÇÃO

O objetivo desta monografia é a apresentação das etapas de desenvolvimento de um sistema de áudio para automóveis de passeio. Nessa área, é crescente a demanda do cliente por sistemas de qualidade e compatíveis com as novas tecnologias que surgem a cada dia. Do lado da montadora e seus fornecedores, cada dia cresce a pressão por sistemas de baixo custo e com massa reduzida. Este trabalho apresenta conceitos relevantes que o Engenheiro de Áudio de uma montadora deve considerar no desenvolvimento do seu projeto. Além da apresentação de conceitos básicos, é dada uma abordagem prática, focada na realidade dos problemas vivenciados em campo pelo autor. Requisitos para a especificação de cada componente e também do sistema como um todo também são mostrados. Por fim, apresentam-se os critérios e testes para validação, com a respectiva análise dos resultados obtidos.

2. CONCEITOS BÁSICOS

2.1.O SOM

O som é produzido pela variação da pressão do ar. Quanto maior essa variação na pressão, maior a intensidade do som, também dito volume. Do ponto de vista físico, pode-se dizer que é maior a amplitude da onda de pressão. A taxa de variação de pressão determina a frequência do som emitido. Para mais detalhes sobre recepção e propagação das ondas AM e FM, consultar o apêndice A dessa monografia.

2.2.dB's

O dB é uma escala utilizada para simplificação da apresentação de potências ou intensidades muito grandes ou muito pequenas. Um valor em dB deve sempre ser medido tendo um valor como referência. O cálculo pode ser feito da seguinte forma:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log (\text{valor} / \text{valor de referência}).$$

Como potência elétrica é função quadrática da tensão (ou corrente) e potência acústica o é da pressão, quando “medimos” essas grandezas em dBs, o cálculo será:

$$\text{dB} = 20 \cdot \log (\text{valor} / \text{valor de referência}).$$

Para pressão sonora o valor de referência é $0,00005 \text{ N/m}^2$. Assim, por exemplo: $150\text{dB} = 20.000.000.000 \text{ N/m}^2$;

$$153\text{dB} = 39.905.246.299 \text{ N/m}^2.$$

Ou seja, uma leitura de 3dB a mais significa o dobro do valor.

Seja na parte de tuners, amplificadores ou pressão sonora, o dB é muito útil quando se trabalha com grandes variações de sinais. Alguns “tipos” de dB's comumente usados são: dBm (para potência), dBmv (para tensão) e dBSPL (para pressão sonora).

2.3.WATTS

É a unidade de medida da potência e representa o consumo de energia de um equipamento. 1 Watt é igual a potência de um joule por segundo, conforme a definição do escocês James Watt (1736-1819).

2.4.SPL

O SPL (*Sound Pressure Level* ou Nível de Pressão Sonora, em português), é a grandeza que determina a intensidade do som. Segundo Motitsuki (2010), o SPL está ligado à eficiência, ou seja, de acordo com a especificação de SPL, o alto-falante produzirá mais ou menos energia sonora para uma determinada potência a ele fornecida. A potência especificada para um alto-falante é a que ele suporta sem danos e não deve ser confundida com a intensidade de som que ele fornece. Em outras palavras, um alto-falante mais potente não toca mais alto que os outros, pois quem determina isso é o SPL. Exemplo: um alto-falante de 100W quando alimentado por um amplificador de 50W, fornecerá a mesma intensidade sonora que outro de 200W, se tiverem o mesmo SPL.

3. COMPONENTES DO SISTEMA DE ÁUDIO AUTOMOTIVO

3.1.MÍDIA REPRODUTORA

Por definição de trabalho nas montadoras, a mídia reprodutora (que antigamente era apenas um rádio e hoje em dia cada vez mais são centrais multimídia), não fica sob o domínio de peças de “áudio”, mas no domínio das peças de “*Infotainment*”, termo que significa a união de informação e entretenimento. No entanto, componentes internos a essa peça como o *tuner*, os circuitos amplificadores e especialmente sua possibilidade de controle por software, podem ajudar muito no desenvolvimento da qualidade do sistema de áudio. Estes itens internos não são foco central dessa monografia, porém algumas observações serão apresentadas mais adiante.

3.2.ALTO-FALANTES

3.2.1. Teoria

O alto-falante é um dispositivo eletro-mecânico que transforma a corrente aplicada em sua bobina em movimento de um cone e, conseqüentemente, do ar causando compressão e expansão do mesmo, gerando pressão sonora. A figura 1 apresenta os componentes de um alto-falante.

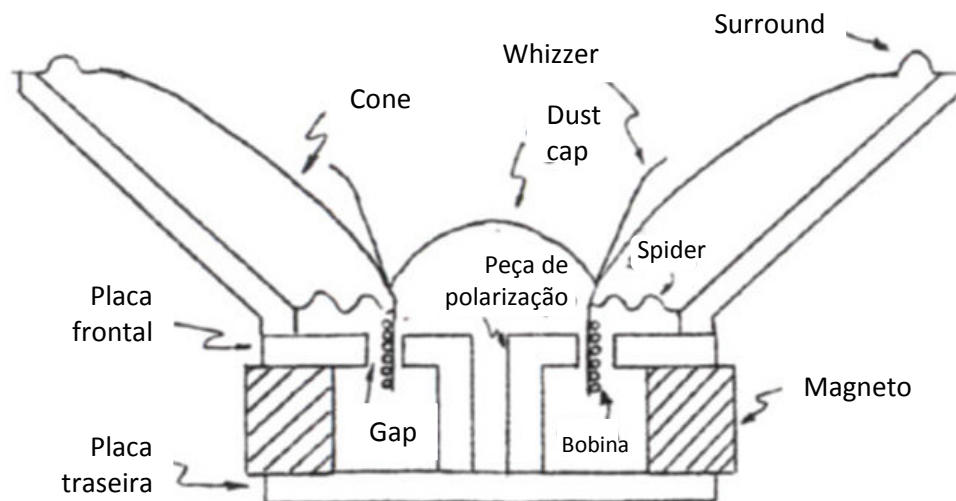


Figura 1: Composição do alto-falante

A seguir é feito o detalhamento dos macro-sistemas de um alto-falante seguindo formato da fabricante Harman Kardon (2011).

3.2.2. O sistema motor

Esse sistema é composto pelo magneto, peça de polarização, placas dianteira e traseira e pela bobina.

Quando um condutor de comprimento “L” é imerso em um campo de intensidade “B” e este condutor é percorrido por uma corrente “i”, existe uma força eletromagnética sobre esse condutor de intensidade $F=BLi$. A direção da força é definida pelo produto vetorial da corrente pelo campo.

Esta é a forma como o alto-falante controla o movimento do cone em função da corrente da bobina. Tem-se a força eletromagnética empurrando o cone e a força de retenção da suspensão segurando o cone.

Essa corrente aplicada será uma composição de senóides, de diversas frequências, fazendo com que o cone se mova pra frente e para trás. O ideal é termos o movimento para frente tão simétrico possível quanto o movimento para trás, a fim de evitar distorções na saída (expansão do ar diferente da compressão, ou seja, o som gerado não seria uma onda senoidal e sim uma onda distorcida).

Para obter esse resultado, precisa-se projetar o campo “B” no *gap* de forma a ser o mais simétrico possível. Como o campo não se trata apenas das linhas que saem em direção reta da placa frontal e atingem perpendicularmente a peça de polarização, esta última deve ser modificada para que as linhas de campo acima e abaixo do *gap* sejam simétricas. Para isso, uma solução é usar um ressalto em direção à placa frontal para simular a face frontal da peça de polarização também na parte traseira, evitando uma configuração diferente do campo.

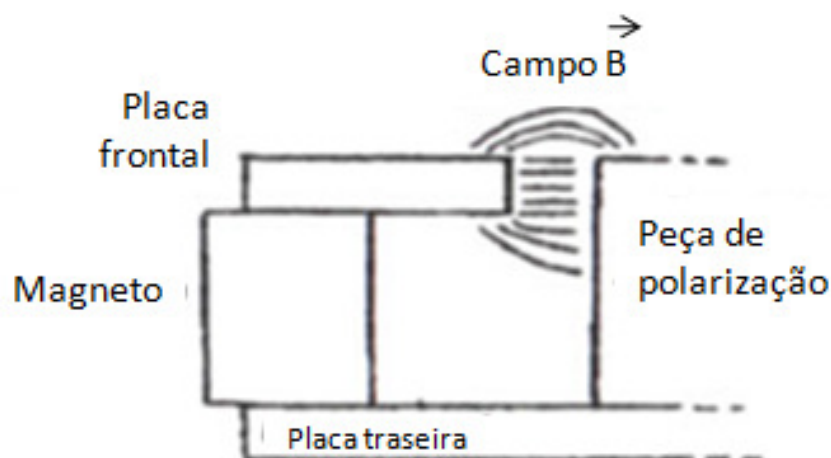


Figura 2: Campo assimétrico

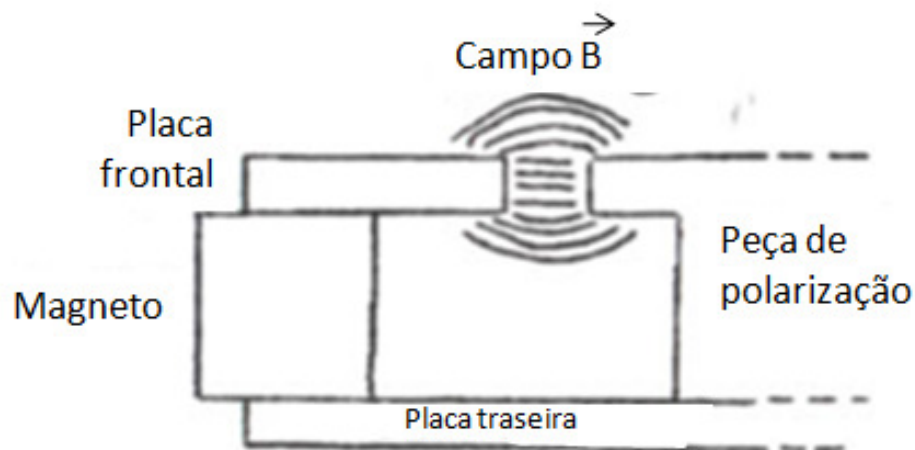


Figura 3: Campo simétrico

Passando para a análise do enrolamento da bobina e a sua interação com o *gap* e o campo e relembrando que a força $F=BLi$, tem-se dessa relação que o alto-falante é responsável apenas pelo produto BL . Para assegurar que a força aplicada seja linearmente proporcional à corrente, o BL deve ser constante em toda a faixa de movimento da bobina dentro do *gap*. Como o B é uma constante do alto-falante, deve-se assegurar que o comprimento “ L ” também seja, assim o número de espiras da bobina que está dentro do *gap* deverá ser constante.

3.2.3. O diafragma

Esse sistema é composto pelo cone e pela capa protetora, conhecida como “*dust cap*”.

Supondo um cone perfeitamente rígido e pensando em termos de frequência, a transferência do movimento do cone para o ar vai ser limitada da seguinte forma: inferiormente pela ressonância do alto-falante (abaixo disso o cone não consegue acompanhar o movimento da corrente já que fica mais “pesado”) e superiormente pelo peso do ar (a massa do ar aumenta). Esse aumento da massa do ar ocorre porque este é um meio viscoso, e assim, possui resistência ao movimento proporcional à velocidade das partículas de ar. Isso aumenta até atingir-se o ponto em que o movimento é anulado, pois qualquer tentativa de aumentar a frequência encontra a mesma resistência pelo ar.

Já no caso do aumento de massa do alto-falante em baixas frequências, isso ocorre pois perde-se a ajuda da força da suspensão (sempre contrária ao movimento) para completar o movimento no sentido contrário no próximo ciclo. Quando o alto-falante atinge o máximo da excursão e começa a retornar à posição de repouso, se a frequência é baixa, ao invés de se

usar a força da suspensão empurrando o cone para a posição de repouso, está se segurando essa força para que o movimento seja feito na frequência da corrente de entrada.

Compreendidos os efeitos da frequência na massa do cone e do ar, pode-se entender a curva de resposta de um alto-falante.

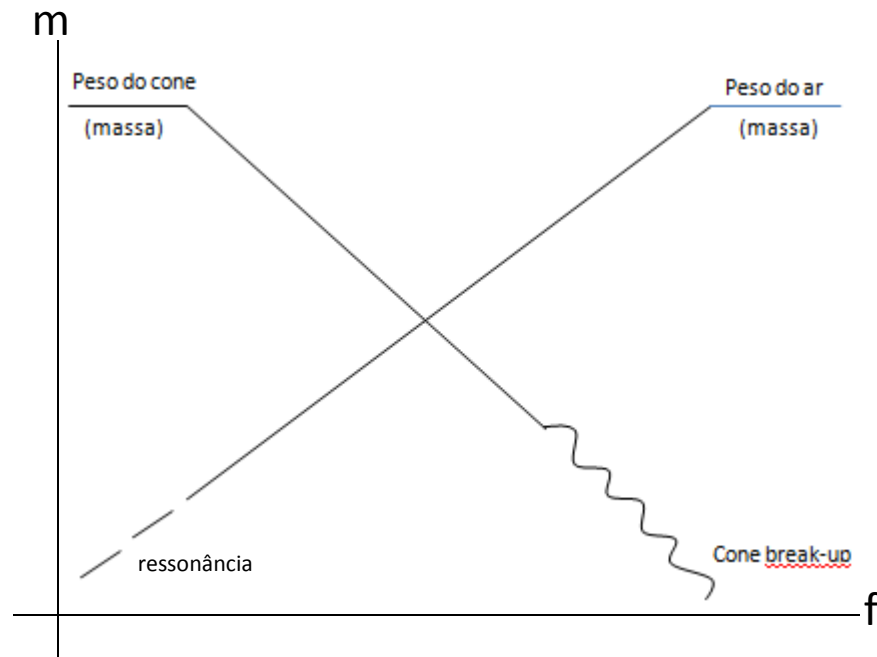


Figura 4: Curva massa de ar x curva massa do cone

A figura acima mostra a curva de massa do ar e a curva de massa do cone. A composição delas gera a seguinte curva de massa:

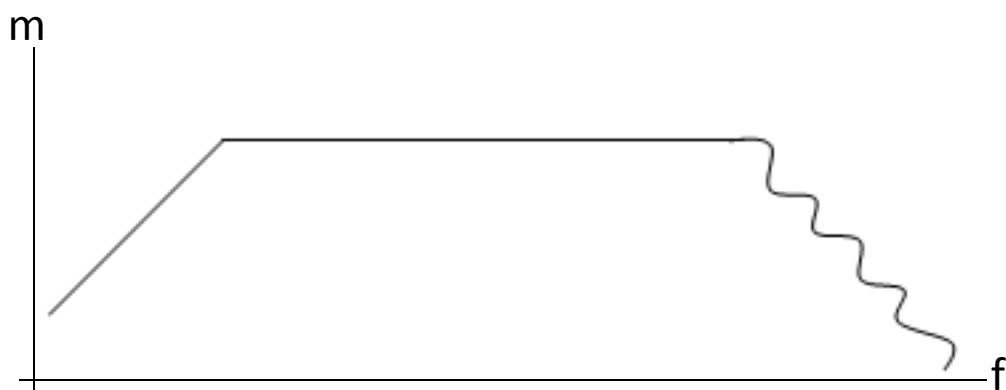


Figura 5: Curva resultante da soma das curvas de ar e cone

A curva acima está diretamente ligada com os limites da curva de resposta do alto-falante. Isso será mais explicado adiante na seção sobre o modelo elétrico do alto-falante.

Sobre o tamanho do cone, a regra básica é: quanto menor for a área do cone, mais facilmente consegue-se fazer o movimento em altas frequências devido a menor resistência do ar nessa superfície menor. Por esse motivo, o falante conhecido como *tweeter* (geralmente de uma polegada, instalado na coluna “A” ou na parte superior da porta do carro) é pequeno. Já para baixas frequências, um cone pequeno não é capaz de empurrar o ar, já que ele é tão pequeno que haverá tempo suficiente para o ar escorrer lateralmente, não existindo assim a compressão e expansão necessária para se produzir som. Portanto, o cone tem que ser maior para termos maior eficiência em baixas frequências.

Nesse momento é importante esclarecer que, infelizmente, o cone não é rígido. Ele precisa ser leve para melhorar a eficiência do falante, ou seja, aproveitar melhor a força aplicada na bobina. Isso implica em se utilizar materiais leves como papel, plástico ou até tecido. Assim, o cone na realidade é flexível. Inclusive esse é um dos motivos para sua forma ser cônica, ou seja, proporcionar maior rigidez. Um outro motivo para sua forma cônica é para evitar o escoamento do ar ao longo do cone ao invés de proporcionar a compressão e expansão do ar.

Esta flexibilidade do cone tem um efeito crítico à medida que aumentamos a frequência, afetando a resposta SPL e a resposta polar do alto-falante (o alto-falante possui curvas de respostas diferentes dependendo se a medida do som é “*on-axis*” ou “*off-axis*”, ou seja, na linha do eixo do falante ou fora dessa linha. Costuma-se levantar curvas em diferentes ângulos para se obter a resposta polar do alto-falante).

É importante notar também que essa forma cônica pode ser um cone perfeito, ou seja, “reto” ou ainda um cone convexo. O cone reto possui uma resposta em frequência com um pico nas altas frequências (final da curva de resposta) e tem uma curva mais larga se comparado com o cone convexo. Já o cone convexo tende a ter uma curva de resposta mais suave e um pico apenas leve no final da curva de resposta. Logo, para aumentar a eficiência em altas frequências, o cone deve ser “flat” (reto) e para baixas frequências, convexo.

Passando agora para o *dust cap*, é importante ter em mente que apesar de ser uma peça multifuncional, ela foi criada unicamente com o objetivo de evitar que sujeira entre no sistema motor e comece a afetar o movimento da bobina no *gap*. O *dust cap* fica posicionado exatamente no centro do cone, já que à medida que se aumenta a frequência, o movimento do cone passa a ser apenas na parte central. Dessa forma, ele afetará um pouco a curva de resposta para altas frequências.

Além disso, ele funcionará como uma bomba de ar para refrigerar a bobina, já que esta esquenta, pois nada mais é do que um fio percorrido por correntes da ordem de alguns amperes. Só que para isso, o *dust cap* deve ser poroso para permitir a saída do ar, visto que o alto-falante é geralmente fechado na parte de trás pela placa traseira e a única saída de ar é pelo *gap*. Sendo poroso, ele também evita que seja criada compressão e expansão de ar dentro do sistema motor em intensidade suficiente para afetar a performance do alto-falante. Evita-se usar furos no *dust cap* para saída de ar pois, dependendo da excursão do falante e volume de ar, pode causar ruídos pelo sopro do ar.

3.2.4. O sistema de suspensão

Esse sistema é composto pela aranha, mais conhecido pela palavra em inglês “*spider*” e pelo surround.

O surround é geralmente feito de espuma ou borracha. Ele ajuda a manter o cone centralizado e proporciona grande parte da força de restauração que mantém a bobina dentro do *gap*. Além disso, ele faz com que o cone termine de forma suave, atuando como suavizador do pico no final da curva de resposta em frequência. O surround é uma ferramenta importante para modelar a curva de resposta em frequência do alto-falante.

O *spider* tem como função principal fornecer a força de restauração do cone à posição original, tendo 80% da *compliance* do falante e outros 20% creditados ao surround. *Compliance* é o oposto da dureza, o que indica o quanto o cone se move para uma força aplicada. Quanto maior a *compliance*, melhor pro alto-falante, pois poderemos ter um conjunto magnético menor e mais barato.

Uma função secundária do *spider* é retornar o cone a sua posição original e evitar que partículas de sujeira caiam no *gap* e causem dificuldades para o movimento da bobina no *gap*.

3.2.5. Modelo elétrico do alto falante

Para se criar esse modelo, deve se lembrar a equivalência entre sistemas mecânicos e elétricos, conhecida como equivalência força-corrente:

Mecânico	Elétrico
Força (F)	Corrente (i)
Momento (P)	Carga (q)
Velocidade (v)	Tensão (v)
Deslocamento (x)	Fluxo (ϕ)

Mecânico	Elétrico	Equivalência
Mola: $v = (1/K) \cdot dF/dt$	Indutor: $v = L \cdot di/dt$	$L = 1/K$
Massa: $F = M \cdot dv/dt$	Capacitor: $i = C \cdot dv/dt$	$C = M$
Amortecimento: $F = c \cdot v$	Resistor: $i = v/R$	$R = 1/c$

Quadro 1: Equivalência entre sistemas mecânicos e elétricos

Essas analogias são importantes para a compreensão sobre qual tipo de componente elétrico deve ser colocado no circuito elétrico para representar um componente mecânico do alto-falante. As relações de equivalência acima, para serem usadas de maneira direta, devem considerar sistema motor como um transformador de corrente de relação BL:1 para termos a corrente (equivalente à força) na saída igual a BL vezes a corrente de entrada.

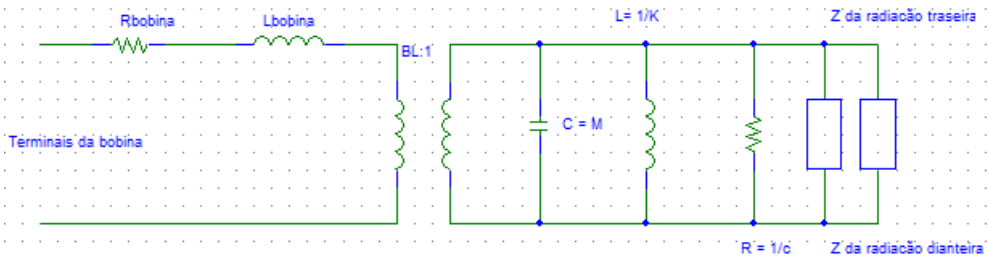


Figura 6: Esquema do circuito elétrico

É importante observar que a massa do cone equivale a um capacitor e que a suspensão equivale a um indutor. Isso explica porque a massa define o limite superior da curva de resposta em frequência e a suspensão o limite inferior, conforme mencionado anteriormente.

3.2.6. Especificações do alto-falante

As próximas seções serão dedicadas à especificação e alguns testes de validação da peça alto-falante em sua interface com o veículo. Elas baseiam-se em documentações de grandes fornecedores e montadoras.

3.2.6.1. Resposta em frequência

A curva de resposta em frequência é medida com o alto-falante montado em um “*baffle* infinito” (na prática, uma mesa de madeira com dimensões adequadas) e o som produzido é emitido em “meio espaço”. Esse termo é usado pois essa medida é feita em uma câmara anecóica, que é uma sala capaz de absorver o som que atinge as paredes sem gerar nenhuma reflexão de som.

O padrão para medida é 1 Watt aplicado e faz-se a leitura com o microfone posicionado a 1 metro de distância do alto-falante sobre a linha de seu eixo.

Faz-se a varredura de frequência de corrente contínua a 22kHz aplicado ao alto-falante e mede-se quantos dB SPL chegam no microfone. Cabe aqui observar que no caso de *tweeters* sem o capacitor em série com a bobina (filtro para as baixas frequências), se for aplicada uma frequência baixa pode-se danificar o *tweeter*, já que sua bobina tem indutância menor para que sua impedância não seja alta em altas frequências, para a qual o *tweeter* é projetado.

Durante a especificação do alto-falante, deve-se fornecer a faixa de frequências que ele deve responder e também é desejável a forma aproximada da curva a fim de auxiliar o fornecedor no projeto da construção física do cone e do surround para se obter o resultado desejado.

Outro ponto importante: como os falantes num carro nunca são montados em direção ao ouvinte e como o som gerado pelo falante é cada vez mais direcional à medida que se aumenta a frequência do tom, é importante medir a curva não apenas na linha de eixo do falante, mas também em ângulo em relação a essa linha. Uma posição comum em veículo, por exemplo, é ter-se aproximadamente 60° do motorista em relação a um falante montado na porta ao seu lado e 30° em relação ao passageiro pra esse mesmo falante. Logo, essas medidas são importantes para garantir que nesses ângulos não haja atenuação na pressão sonora.

3.2.6.2. Power compression

Um bom alto-falante deve ter sua resposta em SPL aumentando linearmente com o aumento da potência de entrada. Se isso não ocorrer, estará havendo compressão de potência (*power compression*).

Assim, na especificação do alto-falante deve-se ter algo que verifique essa ocorrência. Uma possibilidade é se fazer várias medidas da curva de resposta do alto-falante, aumentando-se a potência até atingir-se uma potência próxima da máxima para qual o falante foi projetado. Para cada medida, a potência aplicada ao alto-falante é aumentada em 3dB (dobrada) e espera-se que o falante responda 3dB a mais também. Assim, faz-se medidas em 1W, 2W, 4W, 8W e 16W (+18dB) e, tomando 1W como referência (0dB), normalizam-se todas as outras curvas em relação a ela, fazendo-se a subtração em relação ao que foi medido para 1W. O resultado esperado é que a curva 2W seja uma linha em 3dB, a curva de 4W uma linha em 6dB e assim sucessivamente para um alto-falante sem *power compression*.

Antes de se analisar as curvas de resposta deve-se localizar qual é a frequência de ressonância do alto-falante. Isso porque se houver compressão para frequências abaixo da ressonância, esta pode ser desconsiderada.

Vale lembrar novamente que aumentando a potência, aumenta-se a excursão do cone, que por sua vez diminui o BL (alto-falantes de alta qualidade possuem o BL praticamente linear). Mudando o BL, muda-se a ressonância do falante, ou seja, ela está se movendo para um valor de frequência maior (é como se a massa do cone aumentasse para um BL constante). Dessa forma, é interessante especificar que as respostas espaçadas por 3dB devem ser exigidas apenas para frequências iguais a 1,5 vezes a frequência de ressonância.

3.2.6.3. Distorção harmônica

Harmônicas de uma frequência são todos os múltiplos de uma frequência, ou seja, 1kHz (fundamental) tem 2ª harmônica em 2kHz, 3ª harmônica em 3kHz e assim por diante.

Para medir apenas a distorção total, deve-se remover a frequência fundamental e medir a tensão RMS do sinal remanescente. Isso é a distorção harmônica total.

Ainda segundo documentações de fornecedores, apesar de essa ser uma medida importante para alto-falantes, é interessante saber quanto é a distorção somente da 2ª e da 3ª harmônica (uma par e uma ímpar, sendo as duas de maior amplitude devido sua proximidade com a fundamental) para detectar o que está errado com o alto-falante. Em geral, distorções em

harmônicas pares são decorrentes de problemas mecânicos, por exemplo, bobina raspando no *gap*, flexão do cone entre outros. Já distorções em harmônicas ímpares são decorrentes de problemas elétricos, por exemplo, não linearidade da curva de resposta, problemas de assimetria do conjunto magnético, entre outros.

Portanto, deve-se especificar para o fornecedor uma porcentagem de distorção de 2ª e 3ª harmônicas que garanta a qualidade do alto-falante.

3.2.6.4.Distorção de graves

Devem-se especificar curvas que limitem essa distorção. Essa especificação é dependente das frequências em que o falante trabalhará.

3.2.6.5.Curvas de impedância

Pode-se especificar dois métodos para levantamento dessa curva: corrente constante ou tensão constante. O método da corrente constante é mais simples, visto que a medida da impedância é obtida diretamente. O método da tensão constante é mais complexo, pois se obtém admitância e é necessário matematicamente se obter a impedância, no entanto, esse método representa uma medição numa condição mais real de uso do alto-falante, pois indica uma frequência de ressonância mais real (já que mede efeitos da redução do BL). Cabe ao engenheiro verificar os recursos disponíveis e a sua necessidade para determinar o método mais adequado.

3.2.7. Especificação x problemas do alto-falante

Não basta apenas saber se o alto-falante atende ou não à especificação. É importante saber o que está errado (causa raiz) para que se corrija o falante de acordo. Os próximos sub-itens tratam de testes de validação e os problemas que estes apontam, baseados em especificação de uma grande montadora.

3.2.7.1.Sensibilidade

Se os resultados de testes indicam um valor de sensibilidade menor do que o que foi especificado para o veículo, para o cliente significará que o som está baixo. Para o produto, significa que ou o conjunto magnético é pequeno (BL pequeno, pouca força para empurrar o cone $F=BLi$) ou a massa do cone é alta (massa que será movida pela $F=BLi$).

3.2.7.2.Resposta em frequência

Mostra os mesmos problemas que a sensibilidade do ponto de vista do cliente. Pensando no produto, se a curva apresenta pobres graves em níveis altos de tensão, significa que a suspensão está muito dura (impede a excursão máxima do falante). Além disso, uma curva de resposta em frequência pobre pode indicar diversos outros problemas construtivos da peça.

3.2.7.3.Frequência de ressonância

Trata-se apenas de uma ferramenta para definir e melhorar a resposta em baixas frequências através de manipulação nesses parâmetros. É dependente da massa do cone, tamanho e da força do magneto.

3.2.7.4.*Power compression*

Se a compressão de potência ocorre, são vários os motivos:

- dureza da suspensão produzindo compressão em baixas frequências;
- bobina curta (quando a bobina sai do *gap*, BL diminui e haverá compressão);
- suspensão não linear até onde deveria;
- aquecimento da bobina aumentando a resistência da mesma.

3.2.7.5.Distorção de graves

Se essas distorções estão altas, vários problemas podem estar afetando o falante:

- bobina curta;
- suspensão não é linear enquanto BL é constante;
- conjunto magnético é assimétrico;
- modulação do fluxo pelas correntes de Faraday;
- problemas mecânicos com a bobina raspando.

3.2.7.6.Ruídos estranhos (*squeaks and rattles*)

Pensando apenas no componente, os fornecedores de alto-falante possuem *know-how* para conceber, desde o primeiro protótipo testado, uma peça livre de ruídos estranhos em todas as possíveis posições.

A maior possibilidade da causa de ruídos estranhos na região dos alto-falantes é o *design* das suas interfaces, como o painel de porta ou painel de instrumentos por exemplo. Porém, outra

possibilidade real também seria a má fixação dos alto-falantes. Por isso, o engenheiro de áudio deve sempre se certificar que o torque especificado para os alto-falantes está apropriado. Além disso, é importante seguir formas de fixação e quantidade de fixadores comprovadamente eficientes.

3.3.ESCOLHA DO TIPO E LOCALIZAÇÃO DOS ALTO-FALANTES NO AUTOMÓVEL

3.3.1. Tipos de alto-falantes

É fundamental conhecer os tipos de alto-falantes para se dimensionar o sistema de áudio do veículo. Conforme já explicado, parâmetros como a forma e massa do cone, *compliance* da suspensão, etc., variam de acordo com a resposta em frequência desejada. E quando se ajusta uma faixa de frequência, ao mesmo tempo está se reduzindo a eficiência em outra faixa. Até existem falantes que reproduzem todas as faixas de frequência, porém nenhuma delas com qualidade. Portanto o ideal é ter alto-falantes trabalhando em frequências mais específicas. Essa necessidade gera uma série de tipos de alto-falantes disponíveis. A relação a seguir é baseada no *portfólio* de um grande fornecedor automotivo:

3.3.1.1.Full-range

Tenta responder em todas as faixas de frequência (geralmente vai de 100Hz a 15kHz) e, por isso, não possuem qualidade, mas são leves e baratos. A sensibilidade é moderada, ou seja, não tocam alto.

3.3.1.2.Woofer

Possui um conjunto magnético mais potente e ressonância mais baixa do que o *full range*. Atinge até 5kHz, com uma queda suave a partir dessa faixa até 15kHz. Para compensar essa queda, costumam ser aplicados com *tweeters*.

3.3.1.3.Extended range

É um *woofer* com o *whizzer* adicionado (ver figura 1, item 3.2.1) no centro do cone. O *whizzer* é o responsável por toda resposta em altas frequências desse falante. É uma alternativa interessante, sobretudo para alto-falantes traseiros onde se espera ter agudos também, porém mais “tímidos” para não chamar a atenção do motorista tirando a imagem de “palco” (conjunto tocando na sua frente e não atrás).

3.3.1.4.Coaxial

É um *woofer* com um *tweeter* montado na mesma linha do seu eixo. Possui uma resposta em agudos melhor que um *extended-range* e a aplicação (posição onde será montado, direção, etc.) definirá qual se deve utilizar.

3.3.1.5.Off-axial

Idem coaxial só que o *tweeter* não fica na mesma linha do eixo do falante. Isto pode ser desejável para mover o *tweeter* evitando uma peça próxima ao cone que iria obstruir o som agudo da direção desejada.

3.3.1.6.Tweeter

É um alto-falante pequeno designado a reproduzir as frequências acima de 2kHz ou mais. Possui som bastante direcionável e boa eficiência. Um tipo com aplicações atuais é o piezo-elétrico, onde, ao invés de ter a bobina e o magneto, o movimento do cone é feito pela tensão aplicada em uma peça piezo-elétrica (vibra com a variação da tensão aplicada na peça).

3.3.1.7.Sub-woofer

Semelhante ao *woofer*, porém com a frequência de ressonância bem mais baixa, devido a diminuição da dureza da suspensão, o que aumenta a *compliance* deixando o movimento do cone mais fácil. Estes tipos de falantes possuem um cone maior e mais pesado, além de utilizarem conjuntos magnéticos mais potentes.

3.3.1.8.High clarity

São falantes de alta claridade, ou seja, de distorções mais baixas. O cone é mais rígido, geralmente de fibra de carbono. Alta claridade é uma característica exigida para falantes que vão reproduzir frequências médias (200Hz a 2kHz) onde o ouvido humano é muito sensível à variação de tom.

3.3.2. Localização dos alto-falantes e escolha do tipo

O princípio básico é garantir que tanto o conjunto dos falantes dianteiros como traseiros cubram toda a faixa de frequências, isto porque um mesmo instrumento musical reproduz graves, médios e agudos. Logo, se o sistema de som tiver falantes que cubram apenas médios e agudos na frente e graves atrás, por exemplo, isso dará a impressão que o músico está se movendo pra frente e para trás dentro do carro, destruindo totalmente a imagem de palco dos ocupantes do veículo. Conforme já citado, para se ter essa sensação de palco, os agudos na

parte traseira devem ser mais tímidos, senão o motorista pode ter a impressão de ter a banda tocando atrás de sua cabeça.

Seguindo as melhores práticas de uma grande montadora, na hora de se posicionar o alto-falante no veículo, deve se observar a que ângulo estará a cabeça do motorista em relação ao eixo dos falantes. Se for algo como 80°, por exemplo, certamente ele não estará ouvindo uma pressão sonora considerável daquele falante, especialmente em altas frequências.

Ainda considerando documentação das melhores práticas de uma grande montadora, o *tweeter* do lado do motorista deve estar apontado para a direção do pescoço do passageiro e vice-versa (se fosse na direção do ouvido poderia tornar-se um pouco irritante). Isso porque com a abertura do som do *tweeter* ambos escutarão o agudo dos dois lados igualmente, melhorando assim o resultado estéreo. O ideal seria termos um veículo onde o motorista sentasse no meio.

Apesar de não estar diretamente relacionado com a localização dos alto-falantes, na hora do ajuste do ganho dos falantes, deve se tentar posicionar a banda que está tocando na frente do motorista, só que mais para o centro do veículo (isso é feito fazendo os falantes do lado direito tocarem mais alto, já que estão mais distantes do motorista). Isto porque apesar de se avaliar sempre em relação ao motorista, é comum haver um passageiro no veículo, que não pode ser desconsiderado.

Dependendo de onde vão ser instalados, tratamentos acústicos do local podem ser necessários para evitar que o som produzido pela parte traseira do cone (em oposição de fase ao produzido na frente) seja refletido e anule certas frequências da radiação frontal ou se some com outras frequências. Essa soma e subtração ocorre pois temos diferentes comprimentos de onda (diferentes frequências) sendo refletidos por um anteparo a uma distância fixa da traseira do alto-falante, produzindo ondas em fase e fora de fase com a radiação frontal.

Os alto-falantes devem ser fixados em uma superfície rígida sempre que possível. Se fixado em superfície móvel, este movimento reduzirá o movimento efetivo do cone e, conseqüentemente, sua eficiência em causar a pressão e compressão do ar reduzindo a pressão sonora produzida.

3.3.3. Alto-falantes dianteiros

São os responsáveis pela imagem frontal (palco) do sistema e por cerca de 80% da imagem de estéreo do sistema. Devem também reproduzir os graves para “encher” o veículo, portanto devem responder a partir de 20Hz.

3.3.3.1.Portas dianteiras

Local mais comum para instalação de falantes na parte da frente do veículo. Facilita o balanço estéreo devido sua posição. Geralmente são colocados próximos ao chão do carro para que a distância dos falantes lado direito e esquerdo em relação à cabeça do motorista sejam menos desiguais, o que também facilita o balanço estéreo (o mesmo vale para o passageiro ao lado do motorista).

Entretanto, a perna do motorista ou do passageiro dianteiro atrapalha a imagem de estéreo para frequências mais altas (mais direcionais), que já estão sendo emitidas de uma posição nada satisfatória. Dessa forma, é necessário termos *tweeters* em uma posição mais elevada para ter um caminho sem obstruções para as altas frequências (respeitar o direcionamento cruzado do *tweeter* conforme já comentado no tópico sobre localização de falantes).

A porta também pode ajudar o falante funcionando como uma caixa acústica ou atrapalhar permitindo que reflexões da parede externa da porta se somem e subtraíam da radiação frontal (a porta possui uma série de aberturas para a montagem dos componentes internos, o que permite a passagem dessas reflexões). Algumas vezes, como já mencionado, tratamento acústico dentro da porta será necessário para absorver a radiação traseira e evitar sua reflexão para o interior do carro.

3.3.3.2.Dash

Trata-se do painel do veículo. Abaixo foto da localização de 2 falantes de *dash* no modelo Toyota Aygo de 2010:



Figura 7: Exemplo de alto-falantes localizados no *dash*

Falantes no *dash* ficam mais próximos dos ouvintes, mas dificultam obtenção de imagem estéreo porque a distância entre os falantes fica muito mais desigual. Geralmente tem que ser menores por falta de espaço característico da almofada e, dessa forma, tem menor eficiência em graves. Além disso, o conjunto magnético estará próximo de componentes e chicotes de sinais mais complexos e isso pode causar problemas.

No entanto, conforme mostrado em Halley et al. (2010) o *dash* é um ótimo lugar para se instalar um falante que cubra as frequências médias, pois isso melhoraria a imagem de palco, ou seja, daria a impressão de que o cantor está no meio do palco onde a banda está tocando.

O *tweeter* também pode ser colocado no *dash*, apontado para o vidro, assim os ouvintes vão receber a reflexão do som no vidro. É importante ficar claro que essa não é a melhor solução, mas a falta de espaço pode levar a esse caminho como única solução possível em alguns casos.

3.3.3.3.Coluna A

São as colunas da parte da frente do veículo. Abaixo foto de falante localizado na coluna A do lado esquerdo do Toyota Aygo 2010:



Figura 8: Exemplo de alto-falante na coluna A

Pelo espaço disponível nela, só é possível se colocar o *tweeter*. No entanto, esse posicionamento é o que mais favorece a colocação do *tweeter* afim de direcioná-lo de maneira cruzada, que conforme já explicado, garante a melhor imagem de estéreo. Essa posição vem sendo a mais utilizada para os *tweeters*, já que a porta a cada dia tem menos espaço disponível.

3.3.3.4. *Kickpad*

Conhecido popularmente como “pezinho” são falantes pequenos colocados próximo à área de descanso do pé esquerdo do motorista. Obviamente é uma posição crítica, pois pode afetar até a segurança do condutor, que pode se distrair por ter um som soprando no seu pé ou até mesmo não colocar o pé na posição adequada por causa disso. Logo, não é comum ver falantes nessa posição saindo de fábrica, estes são colocados apenas em lojas de som para ajudar no balanço estéreo. Veja a seguir um exemplo de instalação nessa posição:



Figura 9: Exemplo de falante instalado no *kickpad*

3.3.4. Alto-falantes traseiros

São responsáveis por “encher” o ambiente com som. São usados para completar os graves com frequências de 20Hz para cima e, assim, dar “peso” ao sistema. Devem tocar ligeiramente mais altos para atingir o motorista em um nível de pressão sonora adequado (equalizado com os alto-falantes dianteiros) e apresentarem um agudo um pouco mais tímido (baixo) para não chamar a atenção do motorista.

3.3.4.1. Porta pacotes

Abaixo ilustração de um Volkswagen Voyage ano 2010 com falantes montados nessa região:



Figura 10: Exemplo de falante instalado no porta pacotes

Quando montado nessa região, o alto-falante fica isolado de reflexões da radiação traseira que são jogadas na caixa acústica do porta-malas, que em geral é inclusive revestida. Esta caixa ajuda na eficiência da reprodução dos graves devido ao seu grande tamanho.

A única desvantagem é o som no ouvido do passageiro do banco traseiro, que em geral não é o foco do desenvolvimento do sistema de áudio, porém isso pode variar de acordo com o projeto.

3.3.4.2.Portas traseiras

Nessa região o alto-falante propicia imagem estéreo também aos passageiros do banco traseiro, porém os graves são prejudicados. Portanto, essa montagem é recomendada com o uso de *sub-woofer* no porta malas ou porta pacotes.

3.3.4.3.Colunas “B”

O espaço disponível pode ser útil para acomodar um *tweeter*, idealmente apontado para a frente do veículo, aumentando assim a imagem de estéreo do sistema. A seguir, ilustração da coluna B de um Volkswagen Gol de 2009:



Figura 11: Foto da coluna B de veículo

3.3.4.4. Tampa traseira

Aplicável no caso das peruas, onde geralmente não se tem o porta pacotes disponível para montagem de falantes. Por estarem direcionados para a frente do veículo, ajudam a “encher” o carro com som. De qualquer modo, as mesmas dificuldades para se tirar as frequências baixas existirão, devido ao volume da tampa que se assemelha ao de uma porta (volume pequeno). Nesse caso podem ser necessários tratamentos acústicos internamente à tampa.

3.4. NOÇÕES BÁSICAS DE CAIXAS ACÚSTICAS

Conforme já citado no tópico sobre localização dos falantes, as portas e o porta malas atuam como caixas acústicas e ajudam na reprodução de graves.

Conforme material técnico de fornecedores, antes de se considerar o tamanho das caixas, é necessário entender se onde está montado o falante é realmente uma caixa. A porta, por exemplo, não é uma caixa perfeita. Ela possui várias aberturas para a montagem de seus componentes internos e isso prejudica a reprodução dos graves, já que a pressão de ar produzida pelo falante quando se move para frente (empurrando o ar interno do carro) é reduzida pois parte do ar empurrado retorna para trás do alto-falante (onde foi gerado um vácuo) através dos buracos que existem na porta, ou seja, teremos menor pressão sonora em baixas frequências. Isso afeta apenas a pressão dos graves, pois como são frequências mais

baixas, o alto-falante está se movendo mais lentamente o que proporciona um tempo maior para o ar escoar pelo buraco da porta para trás do alto-falante. O mesmo ocorre quando o cone está se movendo para trás para gerar o vácuo, ou seja, o ar dentro da porta é parcialmente comprimido e parcialmente lançado para dentro do carro reduzindo o vácuo que o alto-falante estava gerando dentro do carro.

Considerando-se o porta malas de um veículo sedan com alto falantes montados no porta-pacotes por exemplo, pode se discutir os efeitos do volume.

Se o volume da caixa é pequeno, a pressão do ar dentro dela vai ser maior para o mesmo movimento do alto-falante em uma caixa maior. Isto vai afetar diretamente a ressonância do alto-falante, pois próximo da ressonância o movimento do alto-falante é muito sensível ao “peso” do ar que ele está movendo. Isso porque nas frequências mais baixas, próximo a ressonância, tem-se a máxima excursão do alto-falante com a suspensão fornecendo a mínima resistência ao movimento do alto-falante.

Sabendo que o cone fica mais sensível ao peso do ar quando se está próximo da ressonância, fica fácil de entender o efeito do volume da caixa na ressonância do alto-falante. Uma caixa de volume pequeno causa um peso maior de ar devido à maior pressão, o que tende a aumentar a frequência de ressonância, prejudicando a reprodução de graves. Da mesma forma, caixas com volume maior vão causar menor peso de ar devido à menor pressão de ar interna e, dessa forma, não afetará a ressonância natural do alto-falante enquanto evita que se perca a pressão sonora produzida pelo cone por ar se movendo da frente para trás do cone e vice-versa quando o cone está causando a expansão do ar no ambiente. O volume ideal é aquele sintonizado na frequência de ressonância do alto-falante, ou seja, a caixa também é ressonante na mesma frequência, aumentando a ênfase dos graves próximos à ressonância.

Tudo discutido até agora para caixas seladas é válido para caixas ventiladas também, ou seja, com um ou mais furos, desde que esses furos estejam posicionados de modo que o ar saindo da caixa pelo furo proporcione ênfase na resposta do cone. Para que isso seja possível, o diâmetro do furo e seu comprimento devem ser capazes de defasar a pressão interna da caixa em 180°, assim a compressão do ar interno da caixa quando o cone estava se movendo para trás vai ser atrasada para coincidir com a compressão que o cone estará produzindo no ambiente na próxima vez que se mover para frente.

Dependendo da aplicação deve-se usar caixas seladas ou ventiladas. As ventiladas são escolhidas para os casos em que se quer, além dos graves, enfatizar a resposta em uma dada

frequência. Isto é útil para aumentar a “força” que o *sub-woofer* vai proporcionar em baixas frequências.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A MONTAGEM DOS ALTO-FALANTES NO AUTOMÓVEL

Em resumo, alto-falantes devem ser fixados em uma superfície rígida para que a vibração da base onde está montado não reduza o movimento efetivo do cone, reduzindo a resposta do falante. Este movimento da base onde ele está montado (no caso dela ser flexível) será ressonante em uma frequência proporcional ao tamanho dessa base. Quanto maior for essa base, mais baixa é a frequência de ressonância.

Outro ponto importante são as peças de acabamento. Peças grandes vão ressoar em frequências baixas e peças pequenas em frequências altas. Essas peças vibrando na mesma frequência em que o ar dentro do carro está comprimindo e expandindo, absorve grande parte da energia naquela frequência e, pior, podem causar ruídos mecânicos por sua vibração.

Outro detalhe que deve ser observado na montagem do alto-falante é a sua cobertura, que é muito delicada. O primeiro ponto a observar é que ela não deve obstruir a passagem do ar (projeção do som). Experiências mostram que as aberturas de pelo menos 65% da área são necessárias para que a perda de pressão sonora seja menor que 1,5 dB SPL. Observe que quanto maior a velocidade das partículas de ar emitidas pelo cone, maior deverá ser a abertura da cobertura. Isto porque o ar é um meio viscoso e a cobertura apresentará uma resistência ao escoamento proporcional a sua velocidade.

Além do cuidado com a área de abertura, deve-se cuidar pra que ela seja posicionada o mais próximo possível do alto-falante (sem afetar a excursão do cone obviamente) para evitar que se abafe o som. Este abafamento do som ocorre pois a medida em que se aumenta o espaço entre o cone e a cobertura, parte do som que seria difundido angularmente no ambiente, é jogado embaixo da peça de acabamento onde a cobertura está fixada.

Não se pode deixar de considerar também que o alto-falante pode estar sendo fixado em uma chapa que, quase sempre, não é plana devido a dificuldades de processo. Dessa forma, pode-se ter um *gap* entre o alto-falante e a chapa que permitiria a passagem de ar, cancelando grande parte dos graves. Assim, um “*gasket*” é usado para selar esse *gap*, geralmente feito de espuma.

4. FILTROS, *CROSS-OVERS* E AMPLIFICADORES

4.1. FILTROS E *CROSS-OVERS*

Filtros são usados para deixar passar através deles apenas as frequências desejadas. Já o *cross-over* é um filtro que possui duas saídas “sincronizadas”, ou seja, as frequências que se removem de uma saída estão sendo colocadas na outra e vice-versa. Eles são importantes, pois quando um alto-falante está trabalhando fora da faixa para o qual foi projetado, apesar da resposta em dB SPL ser mais baixa pela característica natural do falante, ele começa a trabalhar em regiões onde o cone não consegue acompanhar a frequência e o som emitido terá maior distorção ou poderá até, esse falante, ser danificado. Assim, aplicam-se filtros e *cross-overs* para garantir a clareza do som. A seguir, um exemplo de circuito de *cross-over*:

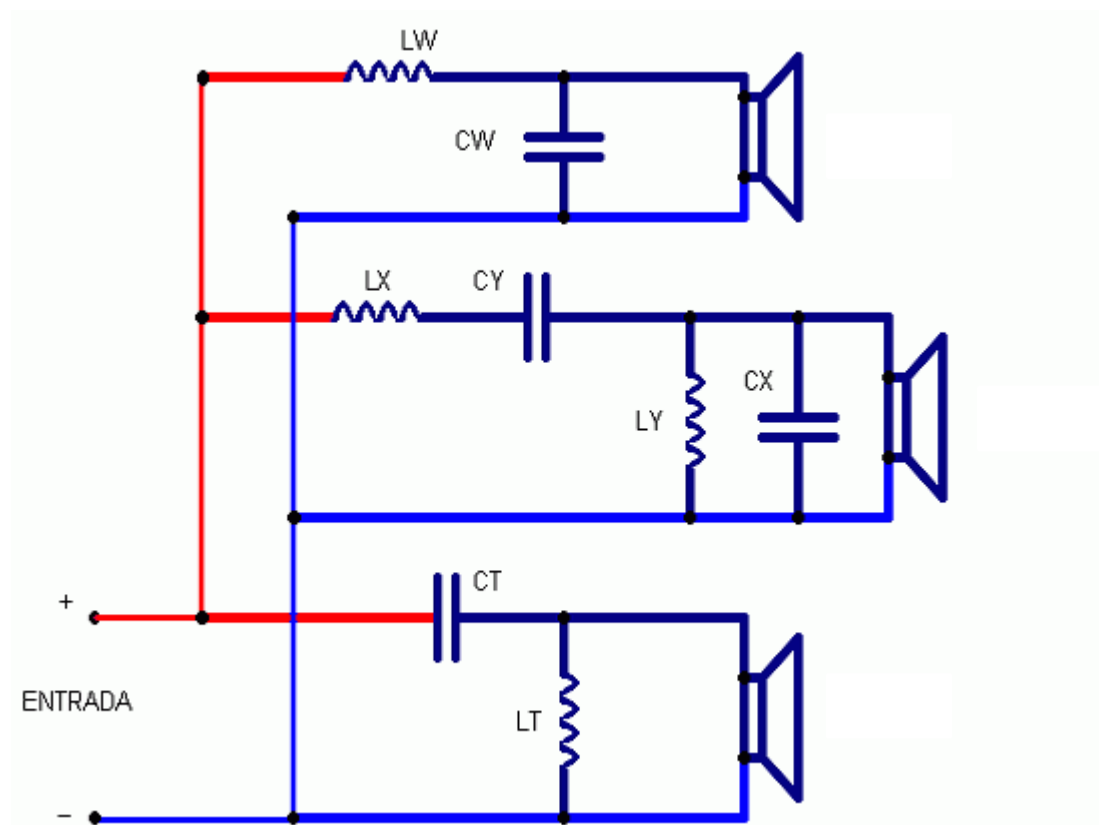


Figura 12: Exemplo de circuito de *cross-over*

4.2. AMPLIFICADORES INTERNOS À MÍDIA REPRODUTORA

Apesar de muito importantes, esse é um tópico com o qual o engenheiro do sistema não precisa se preocupar muito, visto que além da enorme gama de bons CIs que existem atualmente no mercado, pode-se ainda contar com o *know-how* dos fabricantes de mídias na escolha dos mais adequados à aplicação. Entre os *features* mais importantes desses

amplificadores oferecidos pelos fornecedores, estão a eliminação dos ruídos induzidos nas linhas da entrada de áudio e alta atenuação para ruídos de alimentação. Outra característica que é interessante de se solicitar na especificação é o DDL (*Dynamic Distortion Limiter*), que nada mais é do que o controle do nível de distorção.

4.3.AMPLIFICADORES EXTERNOS À MÍDIA REPRODUTORA

Quando o projeto demanda um sistema de som de maior qualidade pode-se fazer uso de amplificadores para atender os *targets*. Apesar da possibilidade de utilizar-se amplificadores microprocessados, essa não é a prática comum, devido ao custo. Logo, a equalização tem que ser feita através de filtros, *cross-overs* e amplificadores em separado. Os CIs equalizadores continuam na mídia reprodutora, onde os controles de graves, agudos, *loudness* e qualquer outro tipo de equalização ficam disponíveis para o usuário. Esse sinal de áudio é então aplicado a *buffers* e levado até o local onde o amplificador externo está montado. Por sua vez, o amplificador será o responsável por amplificar o áudio, reduzir o ruído induzido e equalizar a curva do automóvel.

Idealmente, mídia reprodutora e amplificador têm que estar o mais próximo possível um do outro, no entanto, como o espaço no veículo é sempre escasso, por vezes o amplificador acaba por ser montado no porta-malas. Isso causa ruído induzido no cabo, além das próprias perdas inerentes a ele. Portanto, devem-se tomar alguns cuidados sobre o chicote que será usado para levar o sinal de áudio até o amplificador. Podem-se usar cabos “*shieldados*” para evitar as induções de ruídos e minimizar as perdas, mas isso sai muito caro também. A solução de melhor custo-benefício tipicamente é se aplicar par trançado. De qualquer modo, o ruído induzido por outros ramais do chicote ainda existirá, mas há uma outra vantagem para o par trançado: como os fios estão próximos, o ruído induzido em um fio pode ser considerado igual ao do outro, e, assim, podemos eliminá-los no amplificador externo com o uso de uma entrada diferencial.

4.4.ESPECIFICAÇÃO DO AMPLIFICADOR

Para não haver conflitos entre montadora e fornecedores (especialmente sobre a potência do amplificador), o engenheiro deve especificar por completo como essa potência será medida. Uma grande montadora especifica que os parâmetros que devem ser definidos são:

- Tensão de alimentação: quanto maior, maior será a potência de saída do amplificador.

- Canais com carga: devem-se especificar quantos canais da mídia reprodutora estarão com a carga para o caso de um amplificador de múltiplos canais ser aplicado.
- Distorção harmônica total: Não pode exceder 3% para qualquer frequência na faixa de 20Hz a 20kHz.
- Onde está sendo feita a medida: especificar para o voltímetro estar no terminal de saída da mídia reprodutora, para que se meça a potência sem perda de cabos.
- Frequência onde está sendo feita a medida: também deve se especificar de acordo com a aplicação. É usual aplicação de um sinal de 1000 Hz.

5. EQUALIZAÇÃO DO SOM NO AUTOMÓVEL

Para fazer os alto-falantes de um veículo usa-se a experiência para saber onde localizar os alto-falantes e qual o tipo a ser usado conforme já discutido nesta monografia.

Tomando como base a experiência de alguns prestadores de serviços na área de equalização de som mais a referência de Cecchi et al. (2009), entende-se que uma ferramenta que também ajuda na definição das curvas de resposta preliminares dos alto-falantes é medir a curva de resposta do carro. Isso é feito colocando-se o falante na posição da cabeça do motorista e microfones em várias possíveis posições de falantes. Usa-se baixas frequências, tipicamente abaixo de 200Hz, para que o som não seja direcionável.

Frequências acima disso devem ter falantes colocados de modo que haja um caminho livre para o som, seja “*on-axis*” ou “*off-axis*”. Mesmo com peças de acabamento entre o falante e o ouvinte ainda haverá som que chegará ao ouvinte no “*early arrival*” (primeiro sinal que chega ao microfone depois que emitido pelo alto-falante, ou seja, sem que reflexões do sinal também tenham chegado ao microfone).

Definidas as curvas do alto-falante e adicionada às especificações, os alto-falantes são comprados e testados. O sistema sem equalização é montado no veículo. Cada falante é medido num processo de duas partes.

Primeira parte (frequência 200 a 20kHz) para falantes e *tweeters* e segunda parte (10 a 1200kHz) para falantes. Isto é feito em duas partes, pois na primeira parte a resolução de tempo é importante já que está se trabalhando com frequências mais altas. Para não se medir a energia das reflexões, a medida deve ser feita com uma boa resolução do tempo para não medir reflexões somadas e subtraídas do som original. A resolução de frequências não é tão importante, pois o ouvido humano não consegue distinguir 5kHz de 5.1kHz por exemplo. Prestadores de serviços costumam usar então um step de 50Hz por exemplo, que não causará um tempo grande para decorrer o teste.

Na segunda parte a resolução em frequências é importante, pois o ouvido humano consegue distinguir bem 25Hz de 50 Hz. Ou seja, o *step* de frequência tem que ser pequeno, pois estamos em uma faixa de médios e graves onde o ouvido é muito sensível a variações de tom. Já a resolução de tempo não é importante, pois são ondas de comprimento maior e não são tão refletidas quanto os agudos. Isso é percebido quando se está num veículo fechado tocando em volume alto: é fácil perceber-se os graves, mas não é possível se escutar os agudos, pois quando o comprimento de onda é maior a onda não é influenciada pelas peças do veículo.

As medidas são feitas com uma varredura de sinal direto no falante através do chicote do veículo. Usa-se um aparelho capaz de medir a frequência em uma janela de tempo. Envia-se o sinal de frequência e mede-se a energia recebida por um tempo limitado com um filtro agudo na frequência em que o sinal foi transmitido. Para altas frequências ($>1\text{kHz}$) este tempo é de 20ms e para baixas frequências 100ms. O aparelho envia o tom e faz a medição. O ganho do amplificador (volume) é ajustado em um nível apropriado para a leitura do microfone.

O microfone é montado em suporte especial de modo que fica em movimento rotatório ao longo de uma circunferência horizontal do tamanho da cabeça de uma pessoa e faz-se algumas medidas para se obter a curva média. O microfone fica apontado para o teto pois não se deve medir nenhum sinal *on axis* com o microfone, já que este tem uma resposta linear em todas as frequências se o sinal medido está *off axis* com ele.

Dessa forma tem-se a curva de cada um dos alto-falantes em duas regiões, medidas de acordo com o que é mais importante (frequência ou tempo). É importante observar que o cuidado com as reflexões não existe caso se use uma câmara anecóica, mas isto deve ser feito no veículo para que a função de transferência do próprio seja considerada. De posse de todas essas curvas, estes dados são tratados por software, onde se consegue observar a curva do carro, com todos os falantes atuando conjuntamente.

Nesse momento cabe uma observação sobre o RTA (*Real Time Analyzer*). Ele usa o método de medida da resposta em frequência do carro aplicando-se um ruído rosa, medindo-se com um microfone localizado onde a cabeça do motorista estaria. O RTA recebe o sinal do microfone e indica qual a energia para cada uma das bandas de frequência, indicando como o carro vai tocar, mas sem fazer distinção entre os primeiros sons que chegam ao ouvinte das reflexões. Os primeiros sons que chegam ao ouvinte são os mais importantes para a impressão acústica que o veículo terá. Além disso, se o microfone fica parado, não se consegue medir exatamente o que se ouve, pois o cérebro faz uma média do som ao redor da cabeça. Em resumo, o problema de medições com RTA é psicoacústico, pois ele não mostra como o som será ouvido pela pessoa. Por esse motivo, o trabalho de equalização é feito com o cuidado de separar os primeiros sons do resto.

De posse do sinal de cada falante, pode-se equalizar cada um deles definindo o ganho e a curva do filtro para o sinal daquele falante para que o resultado da curva de equalização seja o mais linear possível. No design do filtro também são removidos os picos colocando-se atenuadores nas frequências em que eles ocorrem. A curva linear é sempre melhor para o

automóvel, mas as vezes se faz a curva que melhor atende o que o cliente quer. Uma curva comum também é a curva linear inclinada para a direita (graves mais acentuados e agudos mais baixos).

A curva nunca será 100% linear na equalização. Haverá variações, mas que não serão percebidas pela pessoa, pois o ser humano houve uma certa frequência em um volume que não é o exato volume em que ela está sendo emitida. Para melhor entendimento, a seguir apresenta-se a curva de audibilidade do ouvido humano:

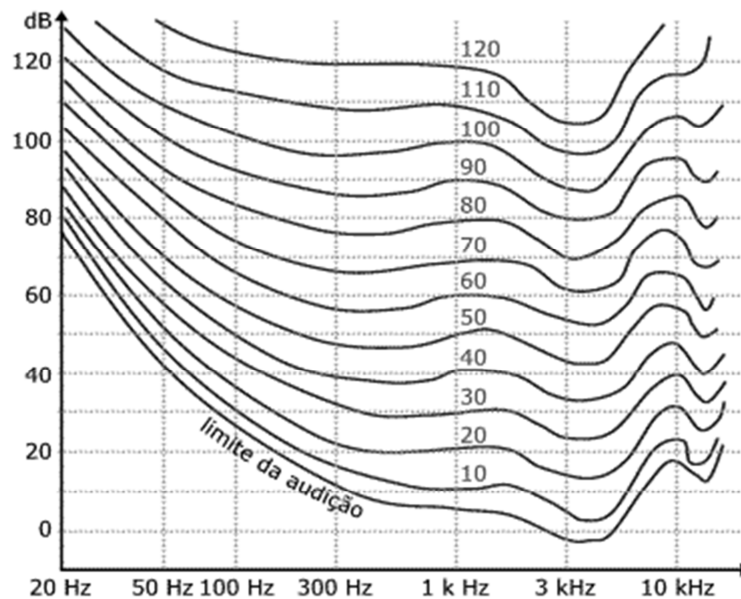


Figura 13: Curva de audibilidade

Na equalização não será feito nada para recuperar grandes vales (que praticamente anulam uma dada frequência) que forem identificados na curva de resposta em frequência. Isto porque eles foram gerados por alguma peça de acabamento do veículo que possui ressonância naquela frequência e também porque não é possível ter no equalizador um filtro tão estreito para compensar isso. Digitalmente isso é possível mas será novamente atenuado pela peça ressonante naquela frequência e pior, a peça se movimentará mais intensamente e poderá causar ruídos, piorando a resposta geral.

Portanto, o uso da equalização é extremamente necessária caso se queira fazer um som de alta claridade. Ondulações na curva de resposta em frequência podem tornar o som irritante pois não existirá suavidade de volume entre distintos tons e estas variações afetam o sistema nervoso, causando inclusive cansaço no sistema auditivo.

5.1.COMO MEDIR O RESULTADO FINAL

Idealmente necessita-se de avaliadores treinados e sistemas de alta qualidade de som. O teste subjetivo ainda é a melhor forma para aprovar o sistema, embora existam alguns métodos objetivos publicados como em Castro, Ferraz e Huallpa (2005). No entanto, em uma das maiores montadoras do mundo, a avaliação é baseada em critérios apenas subjetivos analisados entre o veículo e uma sala de referência. Essa sala simula o efeito que se tem quando o conjunto toca na frente do ouvinte com a precisão e correções gravadas em um CD. Através de um formulário com critérios definidos e com descrições claras, inicia-se o teste ouvindo músicas especificamente selecionadas para avaliar cada quesito. Notas então são atribuídas para cada um dos itens, sempre em comparação com a referência. Assim, pode-se identificar onde estão os problemas do sistema e trabalhar especificamente para que ele seja resolvido.

Esse procedimento corrobora o que pode ser lido em David Clark - Listening test technology for automotive sound system-, que indica que para obtenção de bons resultados precisa-se estabelecer algumas regras antes de se executar a avaliação. São elas: definir o que é um “som bom”, identificar os fatores de performance, identificar o uso do produto, usar uma referência, ter ouvintes treinados, ter um formulário para se obter respostas por escrito, e por fim, construir uma conclusão a partir dos dados obtidos.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a participação de cada parte do sistema de áudio no resultado final de um conjunto automotivo. Este é o ponto de partida para o desenvolvimento do sistema de som automotivo.

Um sistema agradável para qualquer ouvinte é aquele que tem sua curva de resposta o mais linear possível, sem ênfases em qualquer faixa de frequências (*loudness* desligado). A resposta deve conter frequências de 20 a 20kHz, sendo perfeitamente linear de 20 a 2kHz. Depois de 2kHz, se não for exatamente plana, a resposta deve cair “gentilmente” até o final da curva (18kHz ou 20kHz). A imagem estéreo tem de ser perfeita e balanceada. O som dos falantes traseiros enchem o ambiente mas não chamam a atenção, assim o conjunto que está tocando a música precisa ser percebido como estando à frente do motorista. Isto pode ser obtido reduzindo um pouco o nível dos agudos nos falantes traseiros. Os sons devem ser claros e distintos em todos os tipos de música (baixa distorção) com um nível de pressão sonora de pelo menos 105 dB sem distorção.

Como pôde ser observado ao longo dessa monografia, é preciso dedicar muito tempo em cada um dos componentes para que na equalização do sistema seja possível obter um resultado de qualidade. Espera-se que o conteúdo aqui colocado, ajude um engenheiro a planejar, construir e validar o sistema de som automotivo.

7. REFERÊNCIAS

MOTITSUKI, Marcelo Shiguematsu. **Potência RMS vs. SPL. Mitos e verdades da potência elétrica.** Disponível em: <<http://autosom.net/artigos.asp>>. Acesso em: 23 out. 2010.

SASAKI, Mitoshi; TAKAYAMA, Kazuo. AM Tuner for Vehicle. Detroit: SAE Technical Paper Series, 1990.

L.L. Nagy, Automobile antennas. In Antenna Engineering Handbook, 4th Ed. J.Volakis, Ed. New York: McGraw-Hill, 2007, Chap. 39.

LINDENMEIER, Heinz et al. **Antenna for Radio Reception with Diversity Function in a Vehicle.** United States Patent, 2009.

MARRAH, Jeffrey J.; SHATARA, Raed S.. Automotive FM Diversity Systems, Part I: Propagation Channel Modeling and Multipath Review. Detroit: SAE Technical Paper Series, 2007.

Nuremberg: Fujitsu Ten Technichal Journal No.30, 2008. 12 p.

HARMAN KARDON. **Speaker Breakdown.** Disponível em: <<http://www.automotive.harmankardon.com>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

HALLEY, Jérôme et al. **Optimal Location and Orientation for Midrange and High Frequency Loudspeakers in the Instrument Panel of an Automotive Interior.** San Francisco: Audio Engineering Society, 2010.

CECCHI, Stefania et al. **Automotive Audio Equalization.** Michigan: Audio Engineering Society, 2009.

CASTRO, Marco Antonio Pedrosa de; FERRAZ, Fábio Guilherme; HUALLPA, Belisario Nina. **Automotive Audio System Development.** São Paulo: Society Of Automotive Engineers, 2005.

CLARK, David. Listening Test Technology for Automotive Sound Systems. SAE Technical Paper, 1987.

NET CAR SHOW. Fotos de veículos. Disponível em: <<http://netcarshow.com>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

7.1. OUTRAS REFERÊNCIAS

H. Fujii and M. Uemura, Antenna for Vehicle, U.S. Patent Application 20060176227, August 10, 2006.

RUMSEY, Francis. Orchestrating Automotive Audio. **J. Audio Eng. Soc.**, Michigan, v. 56, n. 4, p.303-307, abr. 2008.

CROCKET, Brett; SMITHERS, Michael; BENJAMIN, Eric. Next Generation Automotive Sound Research and Technologies. In: AES CONVENTION, 120., 2006, Paris. **Journal of the Audio Engineering Society.** New York: Audio Engineering Society, 2006. p. 4 - 12.

ISHIHAMA, Masao; TERADA, Kei-ichi; NARAHARA, Akiyoshi. **Vibro-Acoustic Study of Flat Panel Speakers for Better In-car Entertainment.** Michigan: Society Of Automotive Engineers, 2005.

FIELD, Daniel J.. **Design Considerations for Automotive Entertainment System Loudspeakers.** Martinsville: Society Of Automotive Engineers, 1984.

ZIEMBA, Mark. **Measurement and Evaluation of Distortion in Vehicle Audio Systems.** Michigan: Society Of Automotive Engineers, 2001.

DATE, Toshihiko et al. **Built-In Speaker Car Sound System.** Michigan: Society Of Automotive Engineers, 1992.

CLARK, David L.. **Perceptual Transfer Function for Automotive Sound Systems.** Michigan: Society Of Automotive Engineers, 2000.

APÊNDICE A - PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE AM E FM

O alcance de uma transmissão é dependente da potência e forma de onda da antena, da distância do receptor e também da variação do comportamento das ondas de acordo com a frequência. Esse último é influenciado diretamente por interações com a terra e atmosfera.

A.1. PROPAGAÇÃO DO AM

Segundo Sasaki e Takayama (1990), o AM é uma onda média que se propaga basicamente seguindo a curvatura da Terra. É uma mistura de propagação pelo céu e pelo solo, sendo este último uma barreira para que as ondas penetrem e sejam atenuadas, logo o alcance real acaba sendo sempre menor do que o teórico. Esta atenuação também é maior para frequências mais baixas, assim é comum estações AM de frequências mais baixas com maior potência do que estações AM de frequências mais altas. Conforme Nagy (2007) alerta, é importante notar que condições climáticas, podem afetar o desempenho do sistema, como por exemplo a umidade, que afeta diretamente a condutividade do solo, o que pode ocasionar sinais mais fortes ou mais fracos, ampliando ou reduzindo o alcance de uma estação.

Ainda considerando Sasaki e Takayama (1990), relativo à propagação feita pelo ar, 3 camadas da ionosfera são importante para a propagação do AM, sendo que uma delas, devido a irradiação solar, absorve as ondas médias. Conclui-se que durante o dia a propagação é feita basicamente pelo solo. Durante a noite existe apenas uma camada relevante, a qual é altamente capaz de proporcionar a refração das ondas eletromagnéticas. A antena AM é projetada de modo a não se minimizar a radiação vertical. Dessa forma, as ondas refratadas citadas anteriormente irão ocorrer distantes do transmissor (cerca de 80 a 160 Km) e nessa faixa novamente a propagação se dará apenas pelo solo. Após essa faixa, iniciam-se os problemas: as ondas vindas do ar se combinam com as terrestres (somando-se ou subtraindo-se) afetando o sinal junto ao receptor. O pior caso é quando esse cancelamento cai na faixa de frequência da portadora, porque anulando-se a portadora, pode-se ter modulação acima de 100%, causando distorção em detetores assíncronos de AM.

Outra informação a se levar em conta conforme patente de Lindenmeier et al. (2009) é o fato de que devido ao longo comprimento de onda da AM ela não atende perfeitamente as condições de contorno. Em teoria, uma onda eletromagnética é nula próxima a uma superfície condutora como um carro (que possui várias estruturas metálicas), porém não é bem assim na prática devido aos efeitos da propagação. De qualquer maneira, existirá uma grande atenuação

do AM por causa disso. Um exemplo do dia-a-dia é observar a perda de sinal (até 30dB) que ocorre quando um veículo longo estaciona ao lado de um automóvel com rádio sintonizado em AM.

Todos esses efeitos da propagação são considerados defeitos do sistema, porém não há como contornar todos. O que deve ser feito no projeto do *tuner* é tentar minimizar esses defeitos ao máximo como, no exemplo acima, aumentar o parâmetro de sensibilidade do *tuner* aos sinais realmente pequenos vindos da antena. Hoje em dia os *tuners* são 100% digitais, o que permite ajustes mais finos nos mais diversos parâmetros.

O AM ainda tem a desvantagem de estar em uma faixa de frequência comum a fenômenos naturais (raios, por exemplo), e a diversos outros equipamentos inerentes ou cada vez mais comuns em veículos como por exemplo televisão, computadores, *dimmers*, ignição do carro, sistema de carga da bateria, etc.

A.2. PROPAGAÇÃO DO FM

Marrah e Shatara (2007) relatam que as ondas FM propagam-se de forma muito similar a luz, visto que todos os efeitos de reflexão, difração e refração que temos para a luz, existem também para as ondas de rádio. Assim como a luz, essa propagação é basicamente em linha reta, o que obriga a altura da antena ser suficiente para que ela “veja” o receptor.

Como o FM trabalha em frequências mais altas, ele atravessa a ionosfera, e, portanto, não existe a reflexão explicada no AM.

Para entender os efeitos que ajudam ou atrapalham na recepção FM, será necessária retornar à comparação com a luz de Marrah e Shatara (2007). Uma primeira analogia muito útil é a refração nos objetos. Quando há uma fonte de luz iluminando um objeto opaco, sem a refração a transmissão seria apenas em linha reta e atrás desse objeto estaria completamente escuro. Na verdade o que acontece é que logo atrás desse objeto a sombra é mais escura, porém vai clareando à medida que nos afastamos dele pela refração da luz na atmosfera.

Além disso, se colocarmos um refletor de luz atrás desse objeto, essa sombra fica menos intensa ainda. Essa intensidade é o nível do sinal de FM. Graças à refração e à reflexão, é possível receber sinais FM mesmo que existam obstáculos, naturais ou não, no caminho transmissor-receptor.

A refração é também muito suscetível às condições climáticas. Por exemplo, logo antes do amanhecer a umidade é maior, causando uma maior variação de densidade do ar, o que

favorece a refração. Esta dependência do clima faz com que estações de sinal mais fraco sejam ou não recebidas dependendo se está de dia ou de noite ou se está quente e úmido ou frio e seco.

A.3. *MULTIPATH*

Seguindo a explicação do “Fujitsu Ten Tech Journal no.30 (2008) na página 42”, o *Multipath* decorre das reflexões, fazendo com que o sinal chegue até a antena receptora por múltiplos caminhos. Isso faz com que os sinais cheguem fora de fase porque a distância percorrida por cada sinal será diferente. Quando move-se em distância, é como se o sinal estivesse se movendo ao longo do comprimento de onda, passando pelas diversas fases dele. Assim, o sinal pode estar somando-se ou subtraindo-se aos demais sinais que chegaram à antena. Num pior caso pode-se ter um “chiado” no rádio, que ocorre quando um ponto de grande atenuação causa um sinal menor que a sensibilidade do *tuner*.

Uma solução para o *multipath* seria o uso de uma “antena *diversity*”, que consiste num tipo de antena composto por um módulo de controle e um grupo de antenas. Esse módulo faz o chaveamento entre esse grupo de antenas de acordo com o nível de sinal que elas estão recebendo, evitando que o sinal lna do rádio venha de pontos de atenuação, característicos do *multipath*. A aplicação dessa solução é muito comum em carros de mercados desenvolvidos como o europeu e o norte-americano, porém ainda não tão usual nos países emergentes, como o Brasil, apesar de já existir em carros de luxo, que na maioria dos casos são importados.

A.4. *OVERLOAD* OU SOBRECARGA

Além dos “chiados” devido ao *multipath*, outro problema comum em *tuners* é o *Overload*, ou simplesmente, sobrecarga. A grande vantagem é de que este problema pode ser parcialmente solucionado pela eletrônica utilizada no *tuner*.

A sobrecarga ocorre devido ao fato de existirem diversas frequências na entrada do *tuner* e conforme descrito na documentação de validação de uma montadora de porte mundial, os potenciais problemas são:

- Intermodulação de 3ª ordem: quando estações em outras frequências misturam-se com a estação desejada, interrompendo-a;
- Perda de sensibilidade FM: quando há perda da sensibilidade do *tuner* devido à degradação de um sinal fraco por um sinal mais forte, porém sem interrupção;

- Intrusão do FM no AM: ocorre quando a diferença de frequência entre duas estações próximas em FM é igual a uma frequência de estação AM. Pouca ou nenhuma modulação da estação FM é normalmente ouvida;
- AGC “*threshold*”: quando intermitentes efeitos de modulação podem ser ouvidos, como distorção no áudio, alternância de frequências e flutuação no volume. Este fenômeno nem sempre ocorre em sinais de alta amplitude.

A.5. *FRINGE*

Opondo-se a sobrecarga, *fringe* está ligado a sinal fraco na entrada do *tuner*. O mesmo *tuner* precisa ter boa performance tanto em áreas de sobrecarga como em áreas de sinal fraco, logo o ajuste de sensibilidade dele, bem como o ganho e direcionalidade da antena são fundamentais e precisam ser testados em ambos ambientes.