

FAÇA VOCÊ MESMO: CAIXAS ACÚSTICAS DE QUALIDADE SUPERIOR

CAIXAS SELADAS - DUTADAS - SUBWOOFER
PARA O CARRO, CASA, TEATROS, SHOWS, ETC



Introdução:

Se você já está lendo esta introdução é porque certamente tem curiosidade e se interessa por áudio e caixas acústicas. Desta forma acredito que também já imaginou porque certas caixas acústicas são tão caras, enquanto outras são feitas sem o menor critério nos fundos de uma loja de instalação de acessórios automotivos e o instalador garante que aquela caixa tem qualidade indiscutível. Será que seria somente questão de marca, ou realmente existe um trabalho sério de projeto que resulta em uma qualidade que compense o preço? Será que o tamanho e formato da caixa são importantes? Será que um alto falante de 10 polegadas da marca X pode funcionar na mesma caixa onde estava instalado um alto falante também de 10 polegadas de marca Y? Qual a potência que posso colocar sem estragar o alto falante? O tipo da madeira é importante?

Estas são perguntas freqüentes que fazem com que quem vai construir uma caixa se sinta meio perdido. Nesta apostila vamos ver que realmente há muitas considerações a se levar em conta para o projeto de uma caixa acústica.

Através de informações o mais claras possíveis, cálculos comentados, exemplos de projetos e referências bibliográficas, procuro apontar o melhor caminho para que você aprenda a projetar qualquer tipo de caixa: Dutadas, seladas e bazoocas para o carro, subwoofers, domésticas, HI-FI, guitarra, palco etc.

O que é caixa acústica? Para que serve?

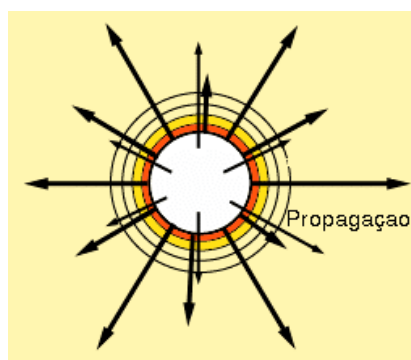
Uma caixa acústica trata-se de um recinto com certas propriedades definidas de modo a condicionar as ondas sonoras produzidas pelo alto-falante. Mais a frente veremos que a caixa isola em seu interior ondas sonoras que poderiam interferir descontroladamente no funcionamento do alto-falante.

Posteriormente, o correto cálculo da caixa pode utilizar-se destas ondas benéficamente ao invés de desperdiçá-las no interior da caixa. Tenho ainda que ressaltar que se o cálculo incorreto da caixa pode provocar também distorções no som e não dificilmente danos ao alto-falante.



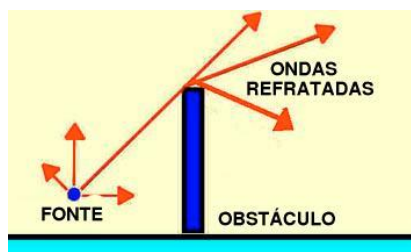
O som e suas propriedades

Como aprendemos na escola, o som é uma onda, vibração, que se propaga somente por meios materiais, por exemplo madeira, aço, água e também pelo ar. Sua velocidade de propagação no ar é de aproximadamente 340 metros por segundo na temperatura de 20°C. Isto é, 1220Km/h! Isso se dá através de



ondas de pressão e descompressão que se dispersam pelo ambiente a partir da fonte, crescendo em formato de esfera.

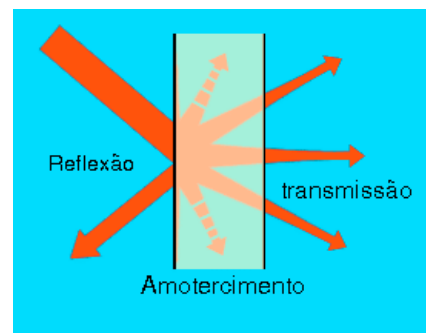
Analogamente a representação em duas dimensões seria como uma onda se propagando na superfície da água, visto de cima.



Dependendo das propriedades da onda e dos objetos que ele encontrar pelo caminho, o som pode ser refletido, desviado ou absorvido.

Você pode inclusive fazer

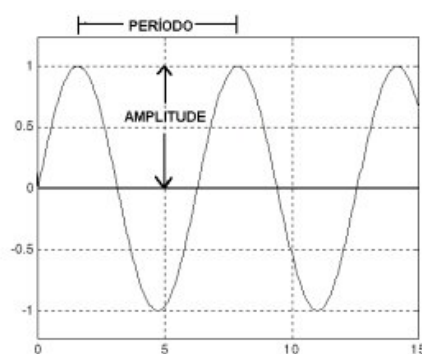
estas experiências na água, colocando alguns objetos no caminho das ondas e observando como elas se comportam. Estas propriedades básicas deverão ser levadas em conta no projeto de



qualquer instrumento musical, e isto inclui nossas caixa acústicas. Tudo isso faz do som uma matéria complexa e que apresenta uma gama muito grande de variantes. Tome como exemplo a música. Nunca soa igual em cada canto deste mundo. Nos causa sensações diferentes dependendo do instrumento que ouvimos, ambiente em que estamos, etc. Podemos logo perceber que cada instrumento tem seu som característico, sua intensidade e tom.

Intensidade, timbre, frequência, frequência audível

Quando analisamos uma onda sonora captada por um microfone por exemplo, é mais ou menos como na figura abaixo que a vemos:

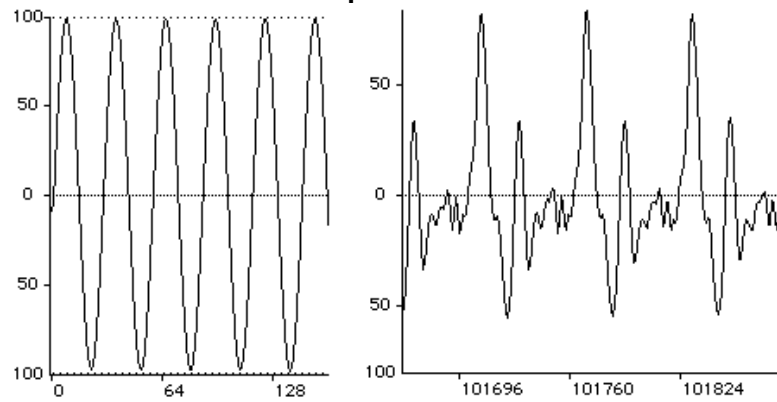


No sentido horizontal do pequeno gráfico, corre o tempo, a medida que o tempo passa podemos ver no sentido vertical como varia a intensidade do som. Ainda nesta figura existe uma segunda informação sobre esta onda. É o seu formato. A forma da onda define o timbre do som que estamos ouvindo. Por exemplo, o formato da onda acima poderia ser o som de um diapasão, que gera ondas de formato senoidal. Seriam muito diferentes os formatos de ondas do som de um saxofone ou de um violino, ou até da voz de pessoas diferentes.

A amplitude define a intensidade do som, o período, que é o tempo que dura uma oscilação, define a frequência ($\text{Freq} = 1/\text{período}$), que por sua vez define as notas musicais e a diferenciação grave-agudo.

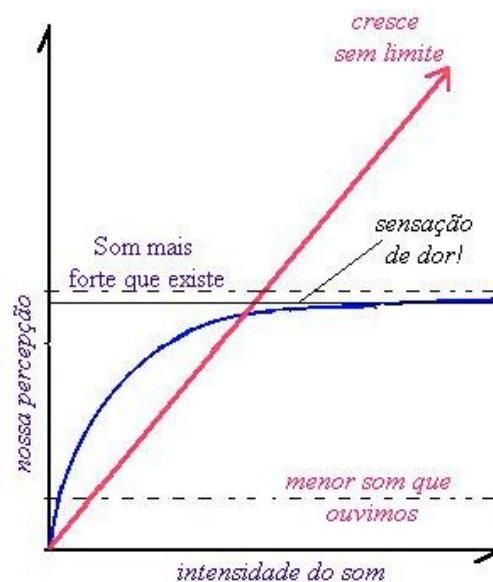
Variações nestes parâmetros: timbre, intensidade, frequência tornam possíveis toda a gama de sons que ouvimos no dia-a-dia. Vamos tomar como exemplo a música clássica. Sabemos claramente a diferença entre os sons de uma flauta e de um violino, mesmo que estejam tocando a mesma nota na mesma intensidade. Isto porque o timbre dos dois é bastante distinto.

Uma harpa e um violino



Quanto a intensidade, tem relação com quão forte ouvimos um som. Cabe aqui uma atenção especial. O correto entendimento de como percebemos variações de intensidade é de muito importância para nós.

A unidade de medida de intensidade sonora é o decibel, ou seja 1/10 do Bel. Esta unidade foi criada para se tratar diferenças entre grandezas como voltagem, corrente, potência etc. A razão principal para a criação desta unidade foi que por se tratar de uma escala logarítmica, pode-se comparar e trabalhar intensidades de sinal muito pequenas com outras muito grandes. Como se não bastasse, nossa audição também reage a estímulos de forma logarítmica, de modo que o decibel torna-se uma unidade que se casa perfeitamente com nossa necessidade.



É fácil entender porque percebemos sons em escala logarítmica. Veja na figura acima que se a escala fosse linear (vermelha), teríamos muitas dificuldades de ouvir sons fracos, como um sussurro, mas se alguém estourasse uma bombinha perto de

nós, pensaríamos que se tratava do fim do mundo. Já a escala logarítmica (azul), devido a sua acentuada curvatura no início da escala, permite que sons muito fracos sejam percebidos e sons quando cada vez mais fortes, vão sendo comprimidos em um limite superior da escala. Por este motivo, as vezes não acreditamos que um som está alto demais, a partir de certo ponto não percebemos tão bem as diferenças de amplitude.

O decibel é definido como uma razão logarítmica:

$$dB = 10 \times \log(P1/P0)$$

Onde P0 é uma potência de referência e P1 é a nova potência. Por exemplo, a diferença em dB que consigo quando injeto 100W em uma caixa que antes tocava com 50W é:

$$10 \times \log(100/50) = 10 \times \log(2) = 3dB$$

logo, se antes a caixa tocava 110dB a 50W, agora toca 113dB a 100W

na prática, quando se dobra a potência o nível em dB cresce tres unidades.

A menor variação de intensidade sonora que podemos detectar é 1dB, mas na prática, devido a diferenças fisiológicas entre as pessoas, a média corresponde a 3dB.

A intensidade sonora ou SPL, do inglês "Sound Pressure Level", também varia com a distância, por isso sempre que especificar uma caixa ou alto-falante, deve-se dizer a que distância o som foi medido, para que sirva como comparação válida.

A fórmula é parecida com a anterior. Para avaliar o SPL em função da distância, troca-se a potências pelas distâncias de referência (d0) e nova distância (d1):

$$dB = 20 \times \log(d1/d0)$$

Você perceberá que na prática o SPL cai seis unidades a medida que se dobra a distância de audição

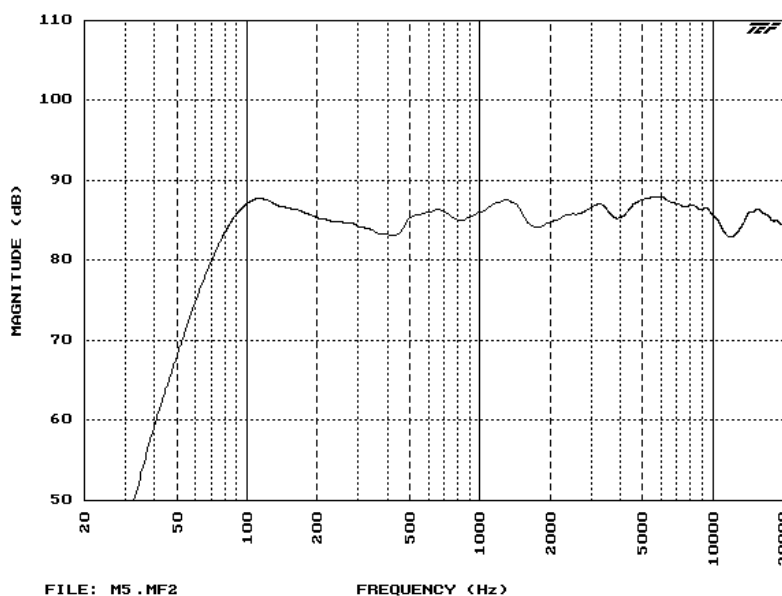
Níveis de pressão sonora de alguns sons:

Nível dB	Som característico
0-10	Limite da audibilidade
20-30	Dentro de casa à madrugada em bairro tranqüilo
30-40	Sussurro a 1,5 metros
40-50	Sons normais dentro de uma residência
50-60	conversa normal entre duas pessoas
70-80	Nível ótimo de conversação para máxima inteligibilidade
80 a 110 - nocivo aos ouvidos se exposto por longos períodos	
80-85	Dentro de um carro esporte a 80Km/h
80-90	Perfuratriz pneumática a 15m
90-100	Ruídos dentro de uma indústria
100-110	Fones de ouvido em volume max.
>110 - Dano auditivo permanente	
110-120	Show de rock em locais fechados
Limiar do desconforto	
120-130	Decolagem de avião a jato a 50m
Limiar da dor auditiva	
130-140	Sirene antiaérea a 30m
...	Continua até 200 = limite

Ouvir música em volumes muito altos acaba provocando desconforto e cansaço mesmo que antes dos 100dB. O volume ideal para se ouvir música de forma prolongada e sem que provoque desconforto ou dores de cabeça é em torno de 65dB.

Outro ponto importante que não pode passar batido é com relação à gama de frequências que podemos ouvir. O ser humano jovem consegue ouvir sons entre 20Hz e 20000Hz. Se forem tocados uma série de sons de 20Hz a 20KHz, todos de mesma intensidade e timbre, vamos perceber que certas faixas ouvimos melhor do que outras. Por exemplo, ouvimos muito bem os tons compreendidos entre 200 e 9000Hz, coincidentemente(?!), a voz humana encontra-se dentro desta faixa.

É muito importante ter conhecimento da faixa de frequência que queremos reproduzir com uma caixa. Nosso desafio aqui será principalmente com as baixas frequências. Você poderá ter mais noção disto observando uma curva de resposta de uma caixa acústica:



Este gráfico trata da resposta de frequência de uma caixa tipo monitor de estúdio de gravação. É nela que os músicos conferem o resultado do que acabaram de gravar, portanto, ela deve atender

certos requisitos de qualidade. O primeiro deles é quanto a resposta de frequências, mais especificamente a planicidade da resposta. É a faixa de frequências que a caixa consegue tocar com qualidade. Para se levantar dados para esta curva, faz-se com que um aparelho gerador de sinais de referência, produza uma varredura de frequências de intensidade constante, que começa antes de 20Hz e vai até depois de 20KHz. Com um microfone capta-se o som da caixa e a intensidade é registrada para cada frequência.

Repare que a curva torna-se plana a partir de 100Hz (apesar das pequenas irregularidades, considera-se plana) e permanece assim até 20KHz. Esta planicidade é importante pois garante que todos os sons compreendidos dentro desta faixa serão reproduzidos na mesma proporção com que foram gravados. Note que abaixo de 100Hz, a intensidade dos sons da caixa cai quase que linearmente. Isto é perfeitamente normal, depende do conjunto falante-caixa. Como é padrão considerar uma tolerância de $\pm 3\text{dB}$, pode-se dizer que esta caixa toca de 70Hz a 20KHz a $\pm 3\text{dB}$. Este rendimento corresponde a quase todas as caixas de conjunto mini-system do mercado. Porém estas possuem outras características de menor qualidade que um monitor de estúdio.

Sejamos francos, qualquer alto falante, em qualquer caixa, vai gerar som quando for ligado a um aparelho apropriado. De fato tocará música e provavelmente entenderíamos todas as palavras que o cantor dissesse. Então você deve estar se perguntando: Oh diabos! Para que então tanta ladainha? vamos logo construir esta caixa!

Calma que eu explico:

Um alto falante trata-se de um aparelho que retém em si conceitos de engenharia e conhecimentos muito avançados. Um projeto de um alto falante, pode demandar de meses a anos de trabalho, dependendo do grau tecnológico da empresa. Durante este período são estudadas as maneiras para que este componente de mecânica fina reproduza o mais fielmente possível a peça musical tal como ela fora executada no ato da gravação. Deve-se considerar ainda que o principal ator neste processo é o ar e que este altera drasticamente suas propriedades de acordo com a temperatura, pressão, umidade etc. Imagine o esforço dos engenheiros em imaginar um modo de driblar estas variáveis para que o resultado final seja aproximadamente o mesmo independente das condições do ambiente. Durante sua produção, todo o processo é controlado nos mínimos detalhes para que cada peça fabricada seja igual a seguinte, com exatidão de até tres casas decimais. Sendo assim não podemos pegar um alto falante novinho e instala-lo em qualquer caixa, provavelmente estaríamos jogando por água abaixo todo o trabalho daquelas pessoas. O fabricante não está “nem aí” porque o preço salgado que você pagou pelo falante acaba garantindo o salário deles. Mas o pior nesta história é que você acaba comprando um ótimo produto, mas por colocar em uma caixa não adequada, este acaba por não render como você esperava e a sensação é de que é você que está jogando fora o dinheiro. Pergunte para quem trabalha com campeonatos de intensidade sonora, qual a importância de cálculos precisos. Verá a preocupação que eles tem em extrair o máximo dos alto falantes, o que nem sempre se resume a colocar mais potência, mas sim um projeto de caixa mais preciso.

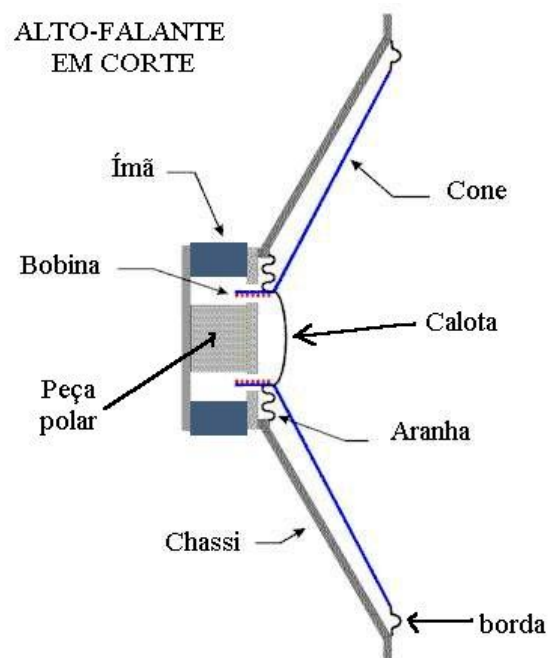
Se a preocupação for com qualidade de reprodução, aí você realmente terá que executar um trabalho que com certeza deixaria os engenheiros muito felizes. Isto porque estes veriam seu alto falante realizando exatamente o trabalho para o qual fora projetado, que é de tocar com qualidade e planicidade em toda sua faixa de trabalho. E fatalmente isto só é conseguido por poucas caixas (para não falar uma caixa) dentro de uma infinidade de modelos em que você poderia colocar o seu falante.

Por estas e outras que o leitor compreenderá de agora para frente a importância dos cálculos das caixas acústicas, porque como o próprio título diz, queremos aqui aprender a construir caixas de qualidade superior!

Aspectos construtivos dos woofers



O primeiro conceito que devemos ter de um alto-falante é que trata-se de um transdutor, ou seja, transforma um tipo de energia (elétrica) em outro (mecânica). É um sistema oscilante onde existe uma massa, representada por todo conjunto móvel, e um efeito de mola e amortecimento provocado tanto pela borda e centragem quanto pelas massas de ar que o cone movimenta.



O movimento do cone do alto falante baseia-se normalmente na força magnética. A interação entre o campo do ima e o campo magnético gerado pela bobina quando esta é percorrida por corrente, cria a força necessária ao seu movimento. A bobina está rigidamente ligada ao cone e este se movimenta para frente e para

trás juntamente com a bobina. O cone deve ser rígido o suficiente para que não se deforme em grandes oscilações. Por isto, hoje em dia se constróem cones não só em papel resinado, mas em plástico, fibra de carbono , kevlar, e até cerâmica. O chassi do alto falante garante que sua geometria não se altere e deve ser o mais rígido possível. A função da borda e da aranha é somente garantir que o movimento seja só de “vai-e-vem”, com todo o conjunto sempre centrado.

Como todo corpo com massa, o cone do alto-falante também possui inércia, que devido ao seu tamanho e constantes de mola de sua estrutura vibrante, vai definir sua faixa de frequência. Deste modo é quase impossível que um alto falante consiga reproduzir toda faixa audível. Comumente, cada tipo de alto-falante consegue reproduzir apenas uma pequena faixa:

Woofers - reproduz sons graves entre 50 e 3000Hz. Possui um conjunto móvel pesado, grandes dimensões e grande excursão do cone. O cone é rígido e não permite que seja deformado pelas altas potências. Deve-se mover como uma superfície firme. A sua bobina deve ter capacidade de dissipar altas potências.

O sub-woofer é um tipo especial de woofer, otimizado para reproduzir graves entre 20 e 150Hz.

O alto-falante de médios, antigamente chamado de squarker, vai reproduzir a faixa compreendida entre 500 e 5000Hz. Hoje em dia em sistemas profissionais para palco, utiliza-se cornetas, mid-ranges ou woofers que consigam reproduzir até +/-5000Hz



corneta de médios

Tweeter - reproduz os agudos acima de 5000Hz. Tem particularidades interessantes, a começar do seu tamanho, muito inferior aos anteriores, devido a maior eficiência da reprodução de agudos e ao fato destes serem direcionais, ou seja são emitidos em uma única direção. Por isso os bons tweeters possuem não um cone, mas apenas uma calota esférica protuberante para ajudar a dispersar os agudos pelo ambiente, veja a figura:



Tweeter de domo

Normalmente estes modelos são caríssimos. Para uso em trio elétrico automotivo e uso geral utiliza-se os modelos profissionais, piezoelétricos ou os de cone de papel, que são mais simples e baratos.

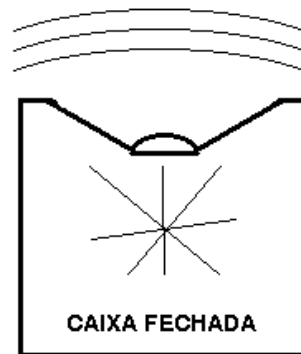
Os tweeters são muito importantes em sistemas estéreo, pois são os sons agudos e médios responsáveis pela formação da imagem estéreo (veja ref. 3 e link 30). Para isso tweeters pertencentes a canais diferentes devem ser instalados o mais distante possível um do outro. Na verdade é ideal que a distância entre os tweeters e a cabeça do ouvinte forme um triângulo equilátero para a maior apreciação dos efeitos estéreo. Pelo fato dos sons agudos serem tão direcionais, qualquer obstáculo entre o ouvinte e o falante de médios/agudos causa interferências. Até mesmo telas. Por outro lado, os sons graves abaixo de 150Hz são tão difusos que em nada contribuem para o som estereofônico, de modo que somente um subwoofer pode ser usado para suprir a falta das baixas frequências, não importando nem a posição dele no ambiente.

O porque da necessidade de caixas

Caixas acústicas são na realidade um sistema eletro-mecânico, onde existe um motor, que é a bobina do alto-falante, e acoplamentos mecânicos entre o alto-falante e o ar. Um alto falante, ao movimentar seu cone, gera uma onda de pressão sonora na sua dianteira e outra de sinal contrário em sua parte posterior. Em frequências baixas, onde a onda sonora é muito difusa, ocorre o encontro das duas frentes de onda. Sendo a primeira negativa e a segunda positiva, estas se cancelam antes de chegar aos nossos ouvidos. Você nunca escutaria os sons mais graves. A função da caixa é isolar as emissões frontais do alto falante das emissões de sua parte traseira, as quais devem ser completamente absorvidas pelo interior da caixa ou aproveitadas de forma positiva, como ocorre nas caixas refletoras de graves. Para qualquer tipo de caixa, suas dimensões irão influir não só na segurança do alto falante, mas principalmente em sua resposta de frequências.



Ondas frontais cancelam as ondas da parte de trás



CAIXA FECHADA

ONDAS TRASEIRAS CONFINADAS NÃO INTERFEREM NAS ONDAS FRONTAIS

O projeto de caixas acústicas está intimamente ligado a tres parâmetros dos alto falantes:

VAS: conhecido como volume equivalente do alto-falante, pode ser entendido como o volume de ar que oferece a mesma resistência ao movimento do cone que a sua suspensão ou borda.

QTS: É um fator de qualidade total do alto-falante. Para fazer suas caixas de sub graves, de preferência a transdutores com qts inferior a 0.7 ou mesmo 0.6 para que não resulte em caixas muito grandes e de baixa qualidade

FS: é a frequência de ressonância ou frequência natural de vibração do alto falante ao ar livre.

Para começar o projeto de sua caixa você deve estar de posse ao menos destes dados do alto falante que irá utilizar. Se este dados não constarem no manual do aparelho, procure na loja de quem lhe vendeu, mas é mais provável que em uma ligação rápida ao fabricante ou busca na internet, você consiga estes dados e muitos outros referentes ao modelo do alto falante que deseja usar.

Dados importantes dos alto-falantes parâmetros Thielle-Small

Entrar em detalhes de como ocorre a interação entre alto-falante, ar e caixa está fora da finalidade desta apostila. Este trabalho já fora traçado em 1961 por dois pesquisadores australianos: Neville Thielle e Richard Small.

Neville Thielle foi o pioneiro no estudo de caixas acústicas "Bass Reflex", aquelas que possuem um duto de sintonia. Seus trabalhos visavam encontrar um método para a correta determinação do volume da caixa e sua frequência de ressonância em função das características dos alto-falantes. Richard Small veio logo depois e ampliou os trabalhos de Thielle. Como resultado, nasceu uma padronização para a fabricação e medida de parâmetros de alto falantes e caixas acústicas, uma série de constantes conhecidas como parâmetros **Thielle-Small**.

Os parâmetros Thielle-Small são constantes específicas de cada alto falante, São as características mecânicas e elétricas de determinado transdutor reduzidas a números.

Estes parâmetros são os dados de entrada para os cálculos de nossas caixas e muita atenção será necessária pois um cálculo descuidado não só irá contribuir para uma qualidade chula mas também é possível que se cause danos aos alto-falantes. E a última coisa que queríamos ver é um alto falante novinho passar a "arranhar" tornando impossível a audição. Este acidente em especial se dá normalmente por sobre-excursão do cone do alto falante. Este literalmente "soca" sua bobina no fundo do conjunto magnético e a empena. Muitos acham bonito ver uma caixa que tenha um alto falante fazendo movimentos exagerados, mas o fato é que a caixa do dito cujo foi projetada com deficiência. Nas baixas frequências, mesmo aplicando potências muito inferiores a suportada pelo alto-falante, ocorrem movimentos vigorosos e a bobina pode bater com força no fundo do conjunto magnético. Nem sempre isto pode ser evitado, sendo necessário adicionar um filtro que proteja o equipamento das frequências muito baixas.

Parâmetros de Falantes e caixas:

Fs: Frequência de oscilação natural (ressonância) do falante ao ar livre

Qes: Fator de perdas de eficiência do alto-falante ao ar livre, considerando apenas perdas elétricas.

Qms: idem, considerando perdas mecânicas.

Qts: Fator de qualidade total do alto falante, inclui parcelas de perdas elétricas e mecânicas.

Vas: volume equivalente, pode ser entendido como o volume de ar que oferece a mesma resistência ao movimento do cone (complitância acústica) que a sua suspensão ou borda

NO: Rendimento do alto-falante

Xmax: excursão máxima do cone em uma direção, para que a bobina permaneça dentro do campo magnético uniforme do ima. Este não é o limite mecânico, se ultrapassar xmax irão ocorrer distorções no som devido a não-linearidade do campo magnético, mas isto não danificará o falante.

Vd: Volume de ar deslocado pelo alto falante quando se movimenta dentro dos limites de Xmax.

BL: densidade de fluxo magnético no gap, multiplicado pelo comprimento de bobina percorrido por este fluxo.

Sd: Área efetiva do cone do alto-falante

Re: Resistência da bobina em corrente contínua, é dada em ohms assim como a impedância, mas não é igual

Le: indutância da bobina medida em mH (milihenries)

Z: impedância. Resistência da bobina a passagem de corrente alternada. Varia conforme a frequência, portanto este é o menor valor assumido. (medido em Ohms).

PE: Potência elétrica suportada pela bobina do alto falante, dada em Watts

SPL: Sound pressure level - nível de pressão ou intensidade sonora, medido em dB. Refere-se também a eficiência do falante, quando medida a 1m de distância, sendo aplicado 1W.

Vb: Volume interno de uma caixa , em litros

Fb: Frequência de ressonância do sistema caixa+duto. Também conhecida como frequência de sintonia do duto.

Fc: Frequência de ressonância de um sistema de caixa selada.

F3: Frequência da qual a intensidade sonora cai para a metade da intensidade de referência, isto é, frequência onde a intensidade cai -3dB

Qtc: Eficiência de um sistema de caixa selada, na frequência de ressonância. 0,71 é o valor que proporciona a resposta mais plana, porém, e mais comum é usar valores entre 0,9 e 1 devido ao reforço nos graves obtido.

Não se preocupe em decorar nada, No momento em que estes parâmetros forem necessários nos cálculos, basta voltar no texto e relembrar.

Qualidade , mercado e valores de potência

O mercado de alto-falantes hoje em dia é um "campo minado". Se você procurar um pouco, poderá encontrar muita coisa boa, mas duvido que não vá esbarrar em muita "bomba" que tem por aí. Devido ao fato do público de som automotivo geralmente não conhecer de dados técnicos dos alto-falantes, o fabricante abusa da publicidade e pecam na qualidade final. Falantes coloridos, que brilham, cromados etc. Não tenho nada contra, mas nem sempre esta maquiagem significa que tocam melhor. Como o foco da atenção dos fabricantes está sobre o mercado automotivo e profissional, fica difícil encontrar alto-falantes destinados a outras aplicações que requerem mais qualidade. O pessoal que gosta de som residencial e hi-fi acabou prejudicado, pois nas lojas só se encontram os equipamentos profissionais, que esbanjam robustez, mas não tem qualidade a altura de um sistema hi-fi. E os automotivos, que possuem parâmetros e até formatos otimizados para serem aplicados em veículos. A solução recai sobre os importados. Isto não quer dizer que você não pode usar um falante automotivo para fazer uma caixa para seu Home Theater, é na hora dos cálculos que você começara a ver grandes diferenças que irão definir sua escolha.

Com um pouco de vivência com os parâmetros técnicos dos alto-falantes logo você estará conseguindo separar as razões. De início, comece a desconfiar daquelas marcas que tentam lhe enganar com valores de potências absurdos, como está explicado mais abaixo. Também pense duas vezes antes de adquirir alto-falantes de imas pequenos e bordas estreitas para caixas de sub-graves. Evite falantes de QTS alto ($>0,5$) quando você estiver querendo sistemas compactos. Mas se, apesar do baixo rendimento, quiser usar alto-falantes fora de caixas, como no tampão, use aqueles de QTS maior que 0,5 e não compre falantes caros para isso, não compensa. Visualmente, o falante que lhe proporciona bom rendimento em caixas sub-graves compactas é o

de ima grande (QTS baixo), borda larga e macia (baixa complitância = VAS baixo) e cone robusto.

É muito importante observar a qualidade e rigidez do cone, bem como a qualidade das bordas e colagens. Observe sempre a sensibilidade do falante (SPL). Deve estar especificada em dB W/m. Isto quer dizer que um alto falante de SPL=93dB W/m, ligado a um amplificador de 250W toca igual a outro de 90dB W/m ligado a um sistema de 500W (lembre-se que ao dobrar a potência, você está aumentando a sensibilidade em apenas 3dB (ref. 2). Baseie-se também pelos anúncios e catálogos de fabricantes que já atuam a algum tempo com sucesso no ramo de sonorização profissional e hi-fi. Isto porque equipamentos de má qualidade não sobrevivem nestes mercados e provavelmente a mesma tecnologia e atenção que dão aos seus produtos "top" darão aos demais.

Sobre potências e RMS x PMPO

Lembre-se, não existe alto-falante "com potência de X watts". Alto falante é um componente passivo, que transforma energia, na verdade, um alto falante de 120W RMS suporta eletricamente 120W sem queimar, porém se for ligado em um amplificador de 50W , tocará igual a qualquer outro alto-falante parecido e de menor potência: 50W. Isto sem contar que tem muita perda no caminho antes de virar som. O fabricante que apresenta como primeiro dado de seu alto-falante o valor da potência, tem a nítida intenção de te "ganhar no papo", cuidado.

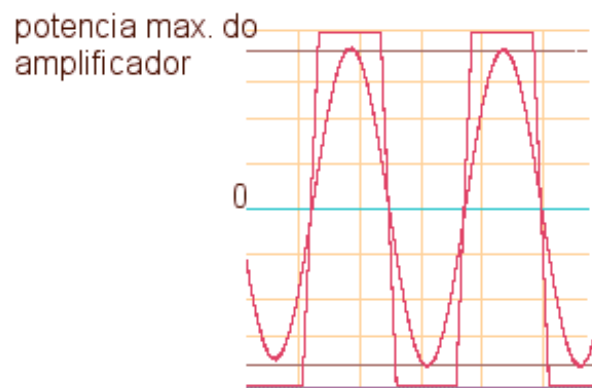
Com relação aos valores de potência, o leitor já deve ter se deparado com números assustadores e não coerentes. Por exemplo, um aparelho tres-em-um a venda no supermercado tem uma etiqueta que diz possuir 4000 Watts de potência. Óbvio que esta informação não é real. Isso seria admitir que este aparelho consome tanta energia quanto meu chuveiro elétrico. O que acontece nestes casos é a unidade de medida que o fabricante utilizou. Na maioria das vezes, potência PMPO, ou seja, uma forma de medir a potência máxima que o aparelho pode gerar, mesmo que seja por um instante mínimo de tempo, até menor que centésimos de segundo. Como não há padronização para esta medida, o fabricante "inventa" como ele quiser a maneira que vai utilizar para fazer a medição da potência PMPO. Isto trata-se de uma jogada de "marketing". Tanto é que basta reparar: a potência dos novos aparelhos aumenta espantosamente enquanto estes continuam diminuindo de tamanho. Ora então porque os amplificadores para shows raramente passam dos 4000W e continuam tão grandes? - vai entender! A medição de potência padronizada pela ABNT é a que vale. Medida em um período de tempo padronizado onde se possa definir a potência média que foi trabalhada pelo aparelho sem que ocorra sua queima. Esta é a

potência RMS ou conhecida como potência real média, esta serve como parâmetro de comparação e deve vir sempre especificada pelo menos no manual do fabricante. Já me deparei com aparelhos que anunciavam 400W na frente de seu painel, mas no manual estava especificada a potência RMS de míseros 6W por canal. Este mesmo raciocínio vale para alto falantes. Nossa referência é potência RMS. Ainda temos um agravante. Esta potência é a que o alto falante suporta eletricamente. Na maioria das vezes o limite mecânico imposto pelo Xmax ocorre antes que toda a capacidade de potência do alto-falante seja aproveitada. Por isso torna-se importante o cálculo e simulação da caixa antes da compra do alto-falante.

Em música existe um parâmetro conhecido como dinâmica (ref: 3). Isto é a diferença entre o som mais "fraco" que toca em uma música e o mais "forte". Qual quer aparelho em volume médio deve conseguir reproduzi-los todos. Vejamos o exemplo de uma típica musica de rock. Se tomarmos somente a variação dinâmica entre o volume médio normal no decorrer da música e os momentos de pico, encontraremos uma variação de 12dB, isto chama-se fator de crista (ref: 6). Agora vejamos, se o sujeito estiver ouvindo em um volume onde o desenvolvimento normal da música consome 2W do sistema. Quando em uma passagem mais forte da música, como um grito do vocalista ou uma base de guitarra onde atinja 12dB acima do nível médio, veja qual a potência necessária para reproduzi-lo:

$$POT = P_0 \times 10^{dB/10} = 2 \times 10^{12/10} = 31,7W$$

Veja que não é todo aparelho que fornece esta potência. Imagine que você estivesse tocando para uma multidão, onde seu sistema já desenvolvia em volume médio de 50W. Se calcular vai ver que necessitaria de 750W nas passagens mais fortes!! Ou ainda, se imagine ouvindo música clássica, onde o fator de crista pode chegar a 30dB.



Quando a potência requerida é maior que a do amplificador, a onda é ceifada e ocorre distorção por saturação do equipamento. A onda perde seu formato, se torna quase quadrada e perde suas informações de timbre. Veja na fig. Acima, a onda ainda dentro dos limites do amplificador e a que excede a potência max. Por aí percebemos que alta potência em um sistema funciona como uma reserva de energia e não para escutar em volume máximo. Exceto se o controle de volume do aparelho já fora projetado pensando isso. A potência PMPO tinha a intenção inicial de especificar a capacidade que certos aparelhos tinham de fornecer alta potência nestes momentos de maior dinâmica, mas como não houve padronização, virou esta palhaçada que conhecemos hoje.

Tipos de caixas, vantagens e desvantagens

Existem várias configurações possíveis para que se construa uma caixa acústica.

São mais comuns hoje em dia as caixas seladas e dutadas devido a sua menor dificuldade de construção e projeto. Esta apostila vai se concentrar no estudo destas duas modalidades mas a saber, existem também as caixas band-pass, cornetas, eletroacústicas, linha de transmissão etc.

Obviamente cada caixa possui seus pontos fortes e suas desvantagens também. Vejamos por exemplo a caixa selada:



Caixa selada

Normalmente apresentam boa resposta a transientes, que são variações rápidas do som, como em um ataque da bateria. Caixas seladas apresentam a possibilidade de se conseguir respostas planas. Devido ao bom controle do cone, apresenta também baixa distorção e exatamente por este motivo, pode-se utilizar altofalantes de grande excursão, que devido ao volume interno fixo, torna-se fácil o controle de X_{max} . Deste modo suportam potências maiores sem danificar o alto-falante. Caixas seladas são boas reprodutoras de sons graves puros e profundos. Também reproduz bem musica nacional, pop, rock, dance.



Caixa selada para uso automotivo

Variando o volume de uma caixa selada podemos ter:

- Menor Volume:
 - ü FC e F3 sobem;
 - ü Resposta de graves fica prejudicada e a curva de resposta adquire um pico proporcional a redução do volume.
 - ü Na região do pico, os graves se intensificam;
 - ü Pode-se injetar mais potência
 - ü Som seco, grave de ataque
- Volume maior:
 - ü Fc e F3 caem
 - ü Toca frequências mais baixas
 - ü A resposta se planifica
 - ü Menor potência aplicável
 - ü Graves profundos e naturais

Sem dúvida é a caixa ideal para o iniciante. É de fácil cálculo e montagem. Proporciona bons resultados e já consegue que o leitor se familiarize bem com os termos. Também trata-se de uma caixa de ótima qualidade, sendo a preferida de muitos puristas.

A próxima caixa que vamos tratar é a dutada. A primeira diferença que enxergamos é o duto de sintonia:



Você pode pensar que trata-se de apenas uma caixa com um furo a mais, mas acredite que este tubo é de suma importância para seu funcionamento.

O duto também funciona como emissor sonoro, contribuindo nas respostas de baixas frequências. O duto apropriado desobriga que o alto falante tenha alta excursão de cone para que renda bem em baixas frequências, de modo que é possível a utilização de falantes de maior sensibilidade, devido a estes possuírem conjunto

móveis mais eficientes (os conhecidos “bordas-secas” usados em som profissional).



Caixa dutada B&W
Repare o tweeter no alto, o
duto embaixo e o woofer entre eles

As caixas dutadas fornecem uma melhor resposta de graves, alto SPL, boa resposta a transientes, mas inferior às seladas. Boa para quem deseja graves reforçados ou utilização ambientes abertos, por ter +3dB de vantagem sobre a selada.

Permite muitas variações de utilização a partir de alterações na frequência de sintonia e volume da caixa

Boa para batidas graves extendidas, como sinfônicas, jass, axé, etc.

A excursão do cone abaixo de fb cresce muito rápido, de modo que é necessário cuidadoso cálculo ou utilização de um filtro subsônico (barra as frequências baixas que fazem o cone entrar em sobre excursão).

Muitos purista não gostam de caixas dutadas pois dizem que introduzem distorções no som, que eles chamam de coloridos. Porém elas continuam ainda sendo utilizadas em larga escala nos mais modernos aparelhos HI-FI.

Home theaters e micro systems pequenos de baixo custo utilizam em sua totalidade caixas dutadas, por que, de outra forma, seria necessário um amplificador duas vezes mais forte para alcançar a mesma pressão sonora com uma selada.

Existem ainda as caixas tipo band-pass, são utilizadas sempre como sub-woofers e apresentam um spl maior que as dutadas em 3dB, e logicamente 6dB maior que as seladas. Contudo, além de ser de mais difícil cálculo e construção, não permite que ouçamos as distorções provocadas por sobre excursão do cone do falante, podendo o estar danificando sem que estejamos sabendo.



Consistem de dois volumes, um selado e outro com um duto sintonizado. O alto falante é posicionado entre os dois recintos acústicos, os quais possuem dimensões críticas, e não fica visível. Fica interno a caixa.

É chamada também de radiador indireto, pois somente o duto irradia pressão sonora para o ambiente. Seu cálculo deve ser minucioso e não vamos fazer aqui, porém os softwares que indico fazem com precisão.

Caixas como esta criam graves vigorosos em shows e cinemas, utilizando alto falantes profissionais. Seu uso também se disseminou em som automotivo com grande sucesso. A desvantagem desta caixa é o seu tamanho avantajado.

Veja a figura:



Caixa Band-Pass automotiva com
parede frontal de acrílico e iluminação
para que os alto falantes internos fiquem visíveis

Quando se procura um grave realmente poderoso no interior de ambientes, como automóveis, salas, ou quando ao ar livre, todas estas caixas podem ser projetadas de modo a produzirem um pico na curva de resposta, próximo a frequência de ressonância do local. Em veículos por exemplo é algo entorno de 70Hz. Os fabricantes de som automotivo sempre sugerem caixas para seus alto falantes que apresentam um pico de quase 4dB nesta região. Quando não há a possibilidade de se instalar caixas de graves potentes em salas grandes como teatros ou cinemas, costuma-se instalar caixas picos grandes para compensar as absorções nos estofados e platéia (em +/-50Hz) e aproveitar o reforço introduzido pela ressonância do local. Apesar de produzir um som intenso, na verdade a resposta de graves fica prejudicada.

Aspectos construtivos e mecânicos das caixas

Chegado a este ponto, depois de ver que uma caixa depende de tantos parâmetros, você deve estar se perguntando qual a implicação do tipo de material e métodos de construção no resultado final da caixa.

Se recapitularmos a finalidade da caixa acústica, veremos que a função de isolar as ondas sonoras em seu interior só pode ser cumprida se as paredes forem suficientemente rígidas para que

não vibrem junto com o alto falante. Senão seria como admitir que o alto falante não é o único gerador de som da caixa. As paredes da caixa não podem apresentar vibrações e devem isolar todas as ondas sonoras que possam prejudicar o resultado final.

Mesmo tomando todos os cuidados, não existe um material tão rígido que não vibre. Este efeito produz um som reverberante muito desagradável, como quando alguém fala com a cabeça dentro de um balde. É razoável imaginar que a vibração aconteça pois, dissemos que as ondas da parte de trás do falante são aprisionadas pela caixa. Estas ondas possuem certa energia que é transferida às paredes da caixa quando as tocam. Para evitar este efeito existe a necessidade de absorver esta energia antes que se transforme em vibração ou que amortecia as paredes para que cessem logo de vibrar. Faz-se isso adicionando material de alta densidade, pesados, internamente à caixa como, borrachas densas, como aquelas usadas para forrar bancada de oficinas ou camadas vigorosas de betumem (piche ou manta asfática). Uma caixa bem amortecida deve apresentar um som seco e sem sustentação quando você der “soquinhos” em suas paredes. Portanto podemos perceber que uma caixa acústica deve possuir paredes que ofereçam tanto rigidez quanto amortecimento. Viu porque boas caixa nunca são leves demais! Na seção de links, em fabricantes de caixas, procure por desenhos das caixas para ter alguns exemplos.

Se dissemos que algumas paredes podem vibrar, temos alguns fatores que promovem este efeito, como baixa resistência a flexão e a baixa espessura do material (já viram como vibram aquelas caixas de mini-systems feitas de plástico?).

Paredes feitas em materiais de alta densidade e rígidos, são muito boas acusticamente, necessitando apenas de uma forma de se amortecer as vibrações menores. Por exemplo, o aço é rígido, e necessita de muita potência para fazê-lo vibrar devido a sua grande massa. Porém sem amortecimento, mesmo pequenas excitações fazem suas paredes ecoarem como sinos. Outros materiais mais nobres apresentam muitas vantagens juntas: rigidez, amortecimento e alta densidade, como o granito ou concreto por exemplo. Mas caixas construídas nestes materiais podem ser inviáveis devido ao peso e dificuldade de construção. O material que atualmente representa o melhor custo benefício continua sendo a madeira. Apesar de ser menos rígida e densa que os granitos, oferece vantagens em toda fase de fabricação da caixa.

As madeiras mais utilizadas para se construir caixas são o compensado, o aglomerado e o MDF. Cada qual com suas vantagens. Não é comum utilizar madeira maciça, pois não se tem propriedades uniformes ao longo da peça, mas você pode experimentar também.

O compensado utilizado é aquela madeira formada de várias camadas sobrepostas. É um material muito rígido e fácil de encontrar. Resiste a impactos e é fácil de se trabalhar. Não serve compensado "virola" porque é "oco". E nem aqueles pintados de roxo para usar em obras, porque são de baixíssima qualidade e separam suas camadas.

Quanto ao aglomerado, muitos já devem conhecer, ele é aquele material feito de serragem de madeira prensada com cola, ele esfarela se for exposto a umidade e não suporta se aparafusado muitas vezes no mesmo furo. Também não suporta impactos de transportes, portanto esqueça este material para usar em equipamentos para shows. Use compensado. Mesmo assim ele é um bom material no ponto de vista acústico, é rígido e é barato. Se for fazer uma caixa para usar em casa, ou uma caixa que não será tão "judiada", escolha este material. Mas cuidado, ele exige certa prática para montar, pois não aceita pregos e costuma lascas as bordas.

Quando for comprar aglomerado, certifique-se da qualidade, apesar de ser serragem prensada, tem aspecto liso dos dois lados, veja um pedaço cortado e confira se a serragem é uniforme e fina. Não compre se houver pedaços grandes de madeira ao invés de serragem em seu interior. Agora se a grana estiver sobrando, o melhor material é o MDF.

MDF é uma sigla em inglês que significa "fibras de média densidade". É parecido com o aglomerado, serragem prensada, mas é uma serragem muito mais fina, tipo pó. É uma madeira muito rígida e pesada (densa), que apresenta boas qualidades de amortecimento. Também tem aspecto liso e claro de ambos os lados. Porém é um pouco mais cara que o compensado. Como o aglomerado, trabalhe com parafusos. Esta madeira é comumente usada para se fazer armários e cozinhas planejadas, em qualquer marceneiro você consegue ver. Também fica a dica, você pode adquirir a madeira já cortada nos tamanhos com marceneiros ou distribuidores, mas procure bem porque o preço varia muito.

Lembre-se que quanto mais espessa for a madeira melhor. Uma boa forma de averiguar a espessura necessária para se ter uma boa caixa é considerar que ela deve ser ,mais ou menos, 1/20 da maior dimensão da caixa.

Alguns fabricantes inventam outros tipos de materiais, na intenção de melhorar as características da caixa, mas também de facilitar o seu processo produtivo e diminuir custos. São o caso das caixas injetadas em plásticos de alta densidade ou resinas misturadas com minerais.

A maneira de se montar uma caixa também influi em seu resultado final. Todo corpo possui uma frequência natural de vibração. Isto inclui as paredes da caixa também. Cada parede terá

um modo de vibração que vai depender de suas dimensões, massa, etc. Aqui vemos que o pior formato para uma caixa seria o cubo, pois teríamos seis paredes vibrando igualmente, somando os efeitos citados anteriormente.



Para se fornecer maior rigidez a paredes de caixas acústicas, as vezes são necessários reforços de modo que estes apoiem o painel, dividindo-o em duas ou mais partes menores, mas preferencialmente de dimensões não múltiplas entre si.

Veja esta figura de uma caixa para som Hi-Fi, repare que já logo atrás do Woofer há um reforço horizontal, seguido de outro um pouco acima e outro vertical, mas repare que eles não dividem as paredes em partes iguais. Repare também que o reforço vertical forma um volume para o alto falante de médios dentro da própria caixa de graves. Outra caixa dentro da caixa. Isto é perfeitamente possível desde que fique bem vedado depois de fechada. Há também outros menores, que estão até inclinados. Deste modo, mesmo depois de tantos reforços, se ainda houverem

vibrações, pode-se garantir que estas não ocorrerão na mesma frequência e não haverá soma de efeitos. Note que o reforço horizontal logo atrás do woofer não divide o volume da caixa, ele tem ranhuras que ainda permitem a comunicação da parte inferior da caixa com a parte superior, a função é mesmo só reforçar a parede. A prática mostrou que o tipo de escora mais eficiente é aquela colada longitudinalmente a maior dimensão da caixa.

Para toda caixa que possuir pelo menos duas paredes paralelas, existirão uma série de ondas que possuem comprimento múltiplo inteiro das distâncias entre as paredes. São ondas estacionárias. Estas ondas, que provocam ressonâncias internas, podem ser minimizadas com projetos de caixas que não possuam paredes paralelas, ou com o auxílio de materiais que as absorvam.



Lã de Vidro



Manta acrílica, lã de vidro ou rocha, pasta de algodão, espuma acústica, são alguns dos materiais utilizados para absorver estas reflexões internas a caixa. São encontradas em casas de materiais para refrigeração ou mesmo sonorização. Não são muito eficientes se

forem coladas nas paredes, a não ser que em camadas vigorosas como a figura abaixo:

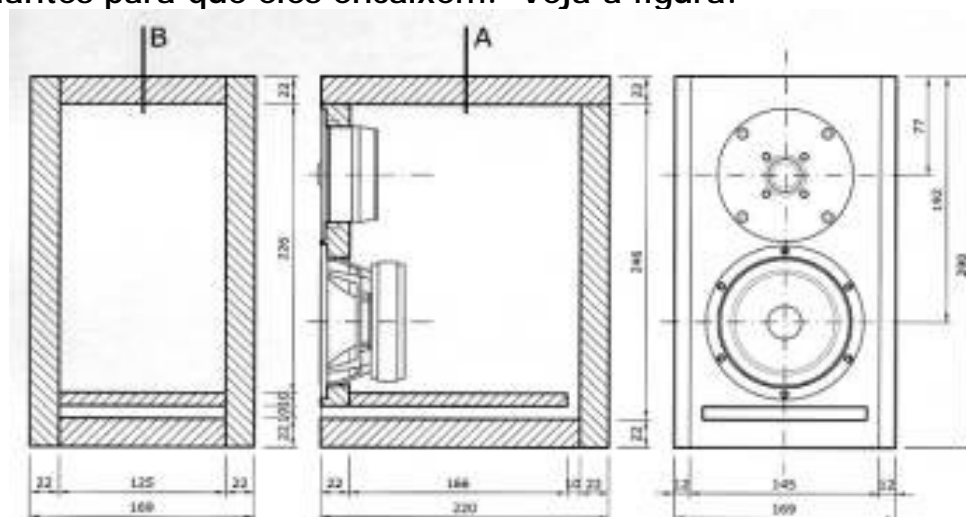
Uma outra forma de se aplicar estes materiais é ao invés de serem colados às paredes da caixa, serem colocados próximo a centro de volume, enrolados nas travessas de reforço ou em formato de caracol, mas sempre em quantidade que ocupe $\pm 50\%$ de todo o volume da caixa. Vale lembrar que a adição de material absorvente causa uma elevação virtual de aproximadamente 15% no volume da caixa, ou seja, na hora dos cálculos, insira na fórmula um volume um pouco maior que o real caso você estiver utilizando material absorvente. Em caso de caixas de competição, não use, pois a caixa perde um pouco de rendimento.

A ordem é aplicar primeiro algum material amortecedor nas paredes caso estas tenham tendência de ficarem vibrando prolongadamente, e sobre ele, aplicar o material absorvente.

Ainda pode-se reduzir tais ressonâncias, pela adoção de dimensões para a caixa não múltiplas entre si. As proporções mais aceitas hoje em dia entre as dimensões de uma caixa para que as ressonâncias sejam mínimas são: 2,6 - 1,6 - 1. Não importando o

que é altura, profundidade ou comprimento. Mas pode-se utilizar outras proporções, desde que não sejam múltiplas. Vemos aqui novamente que o pior formato é o cúbico.

Monte os falantes, na medida do possível, no mesmo nível da madeira, para isso pode ser necessário fazer um rebaixo no furo dos falantes para que eles encaixem. Veja a figura:



Ainda é importante dizer que o correto funcionamento de uma caixa depende muito de sua vedação. Todo vazamento de ar constitui perdas e redução de rendimento. Portanto depois de construída, deve-se passar massa de calafetar, massa plástica, ou até cola misturada com serragem bem fina, por todas as junções internas da caixa. No alto-falante, use massa de calafetar na sua junção com a face da caixa. Não use silicone, pois enquanto seca, a cola de silicone exala gases ácidos que podem danificar o falante.

Feche a caixa travando com parafusos e cola de madeira. Em certas caixas, a pressão no interior fica tão grande que se colocar pregos, a caixa pode começar a abrir.

O furo do alto falante deve ser justo, mas não apertado para não correr o risco de empenar o falante. Use parafusos de fenda Philips para não correr o risco da chave de fenda escapulir e furar o alto-falante novinho.

Veja valores dos diâmetros aproximados dos furos para o falante :

<i>Falante (poleg.)</i>	<i>Dia. Furo (mm)</i>
8	185
10	232
12	280
15	352
18	420

Definindo o sistema

Quando iniciamos um projeto de caixa, devemos começar pela definição do que queremos e o resultado final que esperamos, para que possamos escolher alto falantes, configurações, materiais, etc.

Vamos começar pela utilização: Será um sub-woofer automotivo, para home-theater, ou será uma caixa para retorno de palco ou para guitarra? A partir destas definições podemos começar a estabelecer os limites para as escolhas. O custo sempre será um dos principais limites para qualquer projeto, tenha noção de quanto dinheiro você pode gastar. Vamos listar os pontos importantes:

Qual a resposta de frequência desejável?

O custo final da caixa é importante ou não?

O spl da caixa é mais importante que a qualidade ou não?

O tamanho final da caixa é um fator crítico?

Partindo destas definições você saberá se compensa pagar mais caro em um falante que renda bem em caixas pequenas, ou se será necessário um tweeter ou outro falante para completar a resposta de frequência, ou se poderá construir uma caixa com falantes mais baratos, se poderá investir no acabamento da caixa etc. O importante é que você pesquise, não se atenha a só um fabricante e consulte principalmente os dados técnicos que todo mundo tem preguiça de ler, pois é ali que estão os nossos dados.

Cálculo de caixas

Bom, finalmente você chegou a melhor parte desta apostila, vamos agora calcular algumas caixas. Abaixo serão relacionadas fórmulas para que seja possível o cálculo, mas vale ressaltar que devido a necessidade constante de se refazerem cálculos torna-se muito recomendável que se adquira um software específico para ajuda-lo. Existem excelentes freewares destinados ao cálculo de caixas acústicas. Eles calculam caixas seladas, dutadas e até band-pass. Os melhores que já usei e que recomendo foram o WINISD e o LSPCAD LITE. A vantagem destes programas consiste no fato de que você pode alterar o projeto a qualquer tempo e em "real time" observar os gráficos de desempenho. Também fazem outras análises além da resposta de frequência, como por exemplo a importantíssima análise do XMAX (só o LPSCAD). Caso você não os

encontrar nos endereços abaixo vale procura-los pela internet, pois são fáceis de achar e a ajuda é valiosa.

WINISD: www.linearteam.dk

LSPCAD e outros: www.speakerbuilding.com/software/

A princípio podem parecer complicados de se trabalhar, porém após compreender os exemplos serão extremamente fáceis de mexer. Tenha em mãos também daqui para frente uma boa calculadora.

Algumas recomendações: Se uma caixa possui alto falantes diferentes, ou que toquem frequências diferentes, estes não devem compartilhar o mesmo volume, devendo existir uma repartição interna na caixa. Exceto se o falante for selado e não tiver comunicação do seu cone com o interior da caixa, como os Tweeters e cornetas.

Para caixas Hi-fi, os alto falantes de médios que comuniquem com o interior da caixa, também devem ter seu volume separado, e de preferencia, preenchidos com material absorvente.

Formulas para projeto de uma caixa selada

Para começar o cálculo da caixa, será necessário primeiro conhecer o valor da frequência de ressonância do sistema, ou seja, Fb. para isso, além de Fs e Qts do falante, você deve definir o valor do QTC do sistema. Volte na definição dos parâmetro caso tiver dúvidas de como definir o QTC.

$$F_b = Q_{TC} \times \frac{F_s}{Q_{ts}} \quad (1)$$

O volume Vb em litros para valor do QTC escolhido será dado por:

$$V_b = \frac{V_{AS}}{(F_b / F_s)^2 - 1} \quad (2)$$

Se o QTC que você escolheu foi 0,71 , ou seja, aquele que dá a resposta mais plana possível, o volume que você encontrará acima é o volume ótimo da caixa. Se este volume já te satisfizes, deve-se conferir agora a frequência de corte a -3dB, F3, que diz qual a menor frequência sua caixa toca sem que se perceba redução na intensidade do som.

Se o volume calculado não for conveniente, pelo fato de ser, por exemplo, muito avantajado, podemos partir de um volume desejável e verificar se os valores de F3 e Qtc a serem calculados satisfazem as necessidades de projeto.

Note que ao diminuir o volume será aumentada a frequência de corte F3 e o valor de Qtc.

Inversamente, ao ser aumentado o volume, será diminuída a frequência de corte F3 e o valor de Qtc.

A partir do volume proposto determina-se a frequência de ressonância do sistema, fb, por:

$$F_b = F_s \times \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_b} + 1} \quad (3)$$

e o novo Qtc:

$$Q_{TC} = \frac{Q_{ts} \times F_b}{F_s} \quad (4)$$

O novo F3 será:

$$F_3 = F_b \times \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times Q_{TC}^2} - 1 \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times Q_{TC}^2} - 1 \right)^2 + 1}} \quad (5)$$

Se Qtc e F3 não forem satisfatórios, deve-se repetir os cálculos utilizando-se outro valor de volume. Lembre que quando o volume aumenta, F3 e Qtc diminuem e vice-versa.

Como vimos, inicia-se o cálculo de uma caixa selada a partir de uma condição ótima (Qtc = 0,71).

Se a frequência de corte (F3) ou volume da caixa não satisfazem, deve-se retornar e calcular novamente. Desde o início, a partir de novo Qtc, ou partindo já do volume desejado e analisando as implicações deste novo volume no resultado final.

Com um pouco de prática torna-se bastante rápido o cálculo da caixa, mas pode acontecer que por mais que se tente não se chegue a um resultado bom, isto porque o alto falante não seja indicado para se trabalhar neste tipo de caixa. Para averiguar antes de fazer os cálculos se um alto falante terá melhor rendimento em uma caixa selada ou em uma refletora de graves, use a seguinte comparação:

EBP (Efficiency Bandwidth Product) = F_s / QES

Se não existir informação para calcular o QES, use o QTS mesmo

se EBP for:

50 ou menos = selada ou Bandpass quarta ordem.

50 ou mais = dutada ou Bandpass sexta ordem.

O EBP servirá como uma referência importante para começar o projeto, mas a definição será sua, baseada em suas necessidades de projeto. Não é raro ter de se escolher outro alto falante.

Formulas para o projeto de uma caixa dutada

Estas fórmulas são mais apropriadas para alto falantes com Q_{ts} maior que 0,3 e menor que 0,8. Para valores fora desta faixa, prefira usar um software. Esta preocupação é importante porque o sonofletor tipo refletor de graves é muito mais sensível a erros de cálculo do que uma caixa selada.

Vamos iniciar pelo cálculo do volume ótimo em litros:

$$V_b = V_{as} \times (1,8 - 13,66 \times Q_{ts} + 28,68 \times Q_{ts}^2) \quad (6)$$

Este volume só será ideal se o alto falante possuir Q_{ts} próximo a 0.338. Com este valor a curva de resposta é a mais plana possível. Se o nosso falante não possuir este valor de Q_{ts} , teremos que calcular o volume de caixa que dará maior extensão de graves e resposta mais plana possível.

Ao alterar o volume da caixa, sabemos que a curva de resposta será deformada, temos agora que ponderar o quanto esta deformação irá se desviar da referência.

O fator R pode ser calculado pela fórmula abaixo e corresponde ao valor do desvio em decibéis.

$$R = 20 \log \left(Q_{ts} \times \left(1,38 + 0,91 \times \frac{V_{as}}{V_b} - 0,07 \times \frac{V_{as}^2}{V_b^2} \right) \right) \quad (7)$$

Este fator deve ser o mais próximo possível de zero, mas em virtude das outras avaliações que devemos fazer, isto nem sempre será possível. Desta forma tentamos mante-lo menor do que 3dB. Variações maiores do que esta podem ser percebidas por ouvidos mais treinados e devem ser evitadas. A não ser que seja proposital. Note que para sons de qualidade, picos na resposta de

freqüência de graves podem se manifestar como um som ressonante, conhecido como "som de barril", totalmente indesejável.

Cálculo das freqüências de corte e ressonância da dutada

Como na caixa selada, devemos saber qual é a freqüência de corte a -3dB , F3. E também, para que a caixa dutada realmente funcione, devemos calcular a sua freqüência de ressonância, que posteriormente nos levará ao cálculo do duto de sintonia. Somente assim a caixa irá conseguir transformar as ondas de pressão em seu interior em som pelo duto. Por isso a caixa dutada possui 3dB de vantagem sobre a selada, além do alto falante, o duto também produz som.

Freqüência de corte

$$F3 = F_s \left(0,54 + 0,45 \times \frac{VAS}{V_b} - 0,03 \times \frac{VAS^2}{V_b^2} \right) \quad (8)$$

e freqüência de sintonia :

$$F_b = F_s \left(0,67 + 0,33 \times \left(\frac{VAS}{V_b} \right) - 0,03 \times \frac{VAS^2}{V_b^2} \right) \quad (9)$$

Calculo do Pórtico (duto sintonizado)

O próximo passo é de suma importância, refere-se ao cálculo do diâmetro e comprimento do duto de sintonia. O correto funcionamento da caixa depende deste cálculo.

Escolha um diâmetro que seja mais fácil para você trabalhar, como um tubo de PVC, o diâmetro de uma serra copo que você tenha, etc. Somente tome o cuidado de não escolher um diâmetro muito pequeno, pois isto faria com que o ar passasse muito veloz pelo duto provocando um ruído de flauta, muito desagradável.

Para não errar no diâmetro, escolha algo próximo ao resultado desta fórmula

$$D = 0,06 \times D_{fal} \times \sqrt{F_b} \quad (10)$$

onde:

D = diâmetro do duto (cm).

Dfal= diâmetro do falante (cm) (meça até a metade da borda)
fb= ressonância da caixa.

Porém se a caixa trabalhar com potências baixas e o alto falante não for de “pular muito”, pode-se usar diâmetros menores que o calculado acima.

comprimento do duto:

$$L = \left(\frac{(23600 \times D^2)}{V_b \times F_b^2} \right) - (0,74 \times D) \quad (11)$$

onde:

L = comprimento (cm).

d = diâmetro escolhido

Vb= volume da caixa (litros)

Fb= frequência de ressonância.

Se acontecer que o cálculo de Lv resulte em um valor negativo ou menor que a espessura do painel frontal, torna-se necessário aumentar o valor escolhido para dv. Se o valor do comprimento for igual a espessura da madeira, basta fazer um furo nesta.

Calculando as dimensões da caixa

De posse do volume da caixa, agora nos resta definir as dimensões para poder cortar a madeira e montar.

Se você estiver calculando uma caixa para dois alto falantes iguais, que tocarão juntos, proceda da seguinte forma: Calcule tudo para um só, depois construa uma caixa com o dobro do tamanho e o dobro de dutos calculados (não altere o tamanho dos dutos, só a quantidade). Coloque uma divisão no meio da caixa de modo que cada alto falante ocupe um volume. Ná prática, a maioria das pessoas retira esta divisão mas, apesar de não ser muito recomendável, funciona.

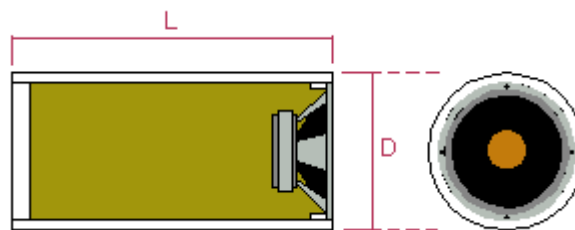
Se for uma caixa retangular o trabalho fica muito fácil. Você necessita definir primeiramente a espessura da madeira que irá usar e duas dimensões da caixa e substituir na fórmula abaixo. Lembre-se de colocar todas dimensões em cm e volume em litros

$$D3 = \frac{1000 \times Vb}{(D1 - 2E) \times (D2 - 2E)} + 2E \quad (12)$$

Aqui, D1, D2 e D3 são as dimensões externas da caixa. D1 e D2 você deve colocar na fórmula, D3 será a dimensão que resta encontrar. A espessura da madeira (E) deve também ser colocada na fórmula

Se sua caixa for do tipo Bazooca, ou seja, em formato de cilindro basta fazer o seguinte:

Como normalmente já temos um tubo com diâmetro definido, vamos calcular o comprimento do cilindro, mas nada impede que você inverta as variáveis e resolva para o diâmetro em função do comprimento.

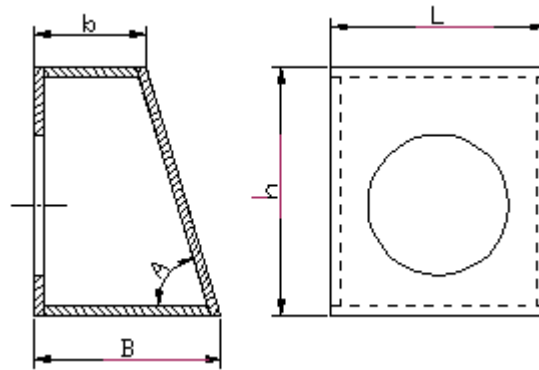


$$\text{comprimento} = \frac{Vb \times 1000}{3,14 \times \left(\frac{D}{2} - E \right)^2} \quad (13)$$

Onde E continua sendo a espessura da parede da caixa em cm e D, o diâmetro externo em cm

As caixas bazooca fornecem graves bem firmes e agradáveis devido a sua geometria cilíndrica que reduz as vibrações das paredes. É comum utilizar para sua construção tubos de papelão (concretubo).

Para caixas trapezoidais, mais comuns em carros:



Vamos definir a altura da caixa (h) em função do volume em litros V_b , da largura L, da base maior B e menor b.
 "E" é a espessura da madeira em cm

$$h = \frac{V_b \times 1000}{(1 - 2E) \times (B + b - 4E)} - 2E \quad (14)$$

Quando você tiver a informação do ângulo de inclinação do banco (normalmente 70°) e altura da caixa (h), saiba que:

$$b = B - (h / \text{tangente de alfa}) \quad (15)$$

neste caso, calcule L em função de todo resto:

$$L = \frac{V_b \times 1000}{(h - 2E) \times (B + b - 4E)} - 2E \quad (16)$$

Para iniciar a construção da caixa, separe primeiramente as ferramentas que irá necessitar: Lápis, régua ou trena, serra manual ou elétrica. A serra tico-tico facilita muito o trabalho, mas exige atenção ao realizar cortes retilíneos, eles podem não sair tão retos assim. Separe também os parafusos, chave de fenda e outras ferramentas que julgar que podem ajudar seu trabalho como uma furadeira por exemplo.

Veja que mesmo que você não tenha intimidade com ferramentas e não goste de realizar o trabalho com a madeira, você já tem conhecimento suficiente para desenhar a caixa e levar a um marceneiro para que a monte para você. Normalmente o serviço não fica caro e agora você sabe o que está sendo feito.

Exemplos de caixas calculadas

Caixa selada

Vamos como exemplo calcular uma caixa para um alto falante.
Vamos usar o modelo street bass de 12" da da Selênium

Os dados deste alto falante são:

$f_s = 33,8$ Hertz

$Q_{ts} = 0,45$

$V_{as} = 144$ litros

A frequência de ressonância do sistema F_b é calculada por (1):

$$F_b = 0,71 \times \frac{33,8}{0,45} = 53,32 \text{ Hz}$$

Vamos calcular a frequência de corte F_3 por (5):

$$F_3 = F_b \times \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times 0,71^2} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times 0,71^2} - 1\right)^2 + 1}} = 53,3 \text{ Hz}$$

Repare que para $Q_{TC}=0,71$, $F_b=F_3$.

Como esta frequência de corte me agrada, vamos agora calcular V_b por (2):

$$V_b = \frac{144}{(53,32 / 33,8)^2 - 1} = 97 \text{ (Litros)}$$

97 litros vai dar uma caixa muito grande para se colocar em um carro, vamos ver o que acontece se reduzirmos um pouco este volume. Vamos passar para 45L, digamos que eu já tinha uma caixa deste tamanho e quero ver se é possível aproveitá-la:

então por (3) e (4):

$$F_b = 33,8 \times \sqrt{\frac{144}{45} + 1} = 69,2 \text{ Hz}$$

e

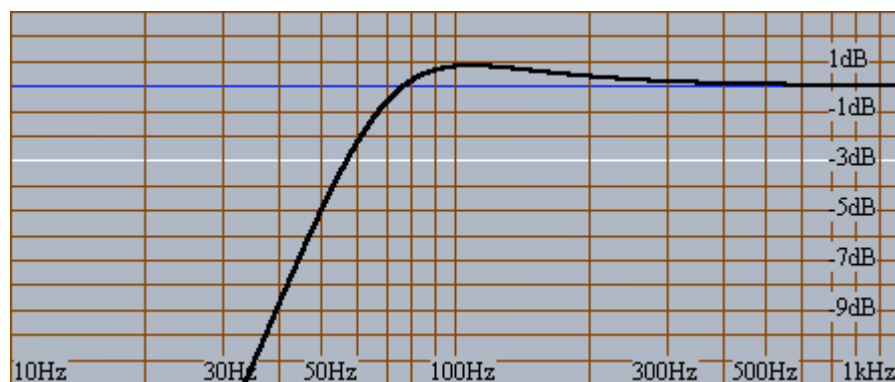
$$Q_{TC} = \frac{0,45 \times 69,2}{33,8} = 0,92$$

A nova frequência de corte será por (5):

$$F3 = 69 \times \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times 0,92^2} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2 \times 0,92^2} - 1\right)^2 + 1}} = 56,5\text{Hz}$$

Este QTC ainda é perfeitamente aceitável de modo que escolho a caixa de 45L, apesar de que de termos uma pequena perda na extensão de graves (o F3 a 97L era mais baixo). O fato é que quando você diminui o volume ótimo, sua caixa irá falar menos grave e aparecerão picos em sua curva de resposta, mas para aplicações automotivas é perfeitamente possível ir até QTC = 1,3. QTC's em torno de 1 São de grande agrado popular, porque o alto falante suportará maiores potências devido ao volume reduzido da caixa, dando batidas secas muito fortes, típicas da música brasileira. Mas esta caixa (QTC=1,3) não falará mais graves que a primeira caixa que calculamos (97L)

Veja a simulação em software da curva de resposta:



Caixa dutada

Exemplo de projeto

Vamos utilizar o mesmo alto falante do exemplo anterior

$f_s = 33,8$ Hertz

$Q_{ts} = 0,45$

$V_{as} = 144$ litros

A primeira operação é determinar o volume ótimo por (6):

$$V_b = 144 \times (1,8 - 13,66 \times 0,45 + 28,68 \times 0,45^2) = 210 \text{ litros}$$

Este valor é impraticável, vamos então escolher 60L e ver o quanto a curva desvia da referência pela fórmula (7):

$$R = 20 \log \left(0,45 \times \left(1,38 + 0,91 \times \frac{144}{60} - 0,07 \times \frac{144^2}{60^2} \right) \right) = 3,06 \text{dB}$$

Tudo bem, está em cima do nosso limite de +/- 3 dB mas vamos usar assim mesmo. Com certeza este é o menor volume que podemos usar se não quisermos sacrificar a qualidade da caixa. Para este novo volume precisamos calcular a frequência de corte (F3).

Usando a fórmula (8):

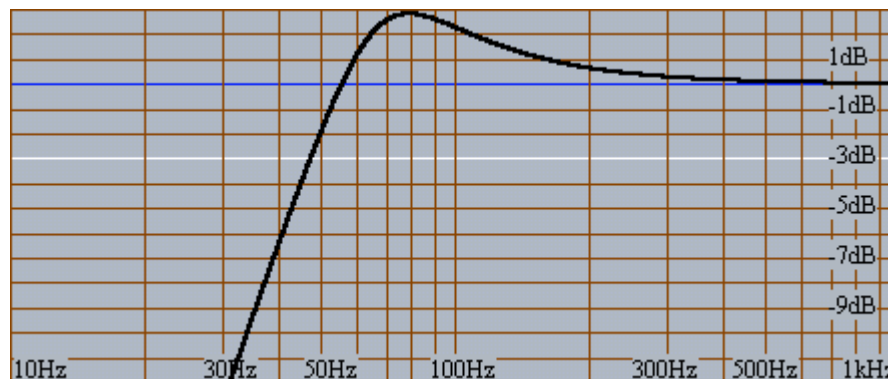
$$F3 = 33,8 \times \left(0,54 + 0,45 \times \frac{144}{60} - 0,03 \times \frac{144^2}{60^2} \right) = 49 \text{Hz}$$

F3=49Hz . Veja como é uma caixa que fala mais grave que a anterior selada.

Devemos agora calcular a frequência de sintonia para posteriormente calcular o duto

$$Fb = 33,8 \times \left(0,67 + 0,33 \times \left(\frac{144}{60} \right) - 0,03 \times \frac{144^2}{60^2} \right) = 44 \text{Hz}$$

Veja a simulação da curva de resposta:



Para iniciar o cálculo do duto vou escolher o diâmetro de 10cm, pois poderei usar um tubo de PVC padrão para construí-lo. Para este tubo teremos um comprimento de:

$$L = \left(\frac{23600 \times 10^2}{60 \times 44^2} \right) - (0,74 \times 10) = 12,9 \text{cm}$$

Pronto, a caixa está calculada. Se preferir utilizar dois ou mais dutos basta alterar o diâmetro de modo que a soma das áreas dos diâmetros sejam iguais a área do primeiro diâmetro calculado. Lembre-se que tanto o duto quanto o alto falante ocupam um certo volume dentro da caixa. Encontre este volume e adicione à caixa quando for construí-la. Alguns fabricantes fornecem o valor do volume ocupado pelo alto falante, quando não tiver esta informação faça uma estimativa e construa uma caixa um pouco maior.

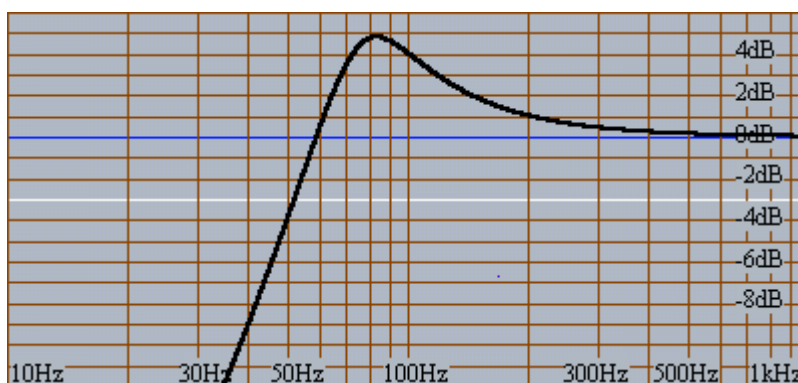
Para analisar se o deslocamento do cone está dentro dos limites, utilize o LSPcad, pois o cálculo de tal parâmetro é mais complicado.

Vamos para continuar os exemplos, analisar as características de algumas caixas prontas ou sugeridas pelos fabricantes.

A Novik recomenda para seu alto falante automotivo "Double Bass" de 12" uma caixa selada de 33 litros.

Novik Double Bass 12poleg.
VAS 176 L
QTS 0.66
FS 30 Hz

Fazendo o EBP (45.4) obtemos que este falante é realmente indicado para caixas seladas
Quando simulamos esta caixa em um software, a curva que obtemos é esta:



Repare o pico de 5dB que a curva apresenta perto de 80Hz. Não é por acaso, esta é normalmente a frequência de ressonância dentro do de carros pequenos

e também é a frequência próxima das batidas das músicas funk, dance, axé etc...

A caixa foi projetada para valorizar o falante, para que todos pensem que ele "dá mais graves". Para esta curva ser plana, este alto falante necessitaria ser instalado em uma caixa de 1200L! Por aí vemos que a utilização deste alto falante fica restrita a automóveis, campeonatos de SPL, enfim onde se queira somente

esta faixa de graves em detrimento da qualidade. Mesmo assim, subgraves mesmo só se a caixa tiver f_3 próximo a 45Hz.

Repare este outro exemplo de uma caixa monitor de estúdio, aqui o alto falante é um VIFA- PL18W0, de 7 polegadas. Um alto falante de alta qualidade.

Os dados do alto falante são:

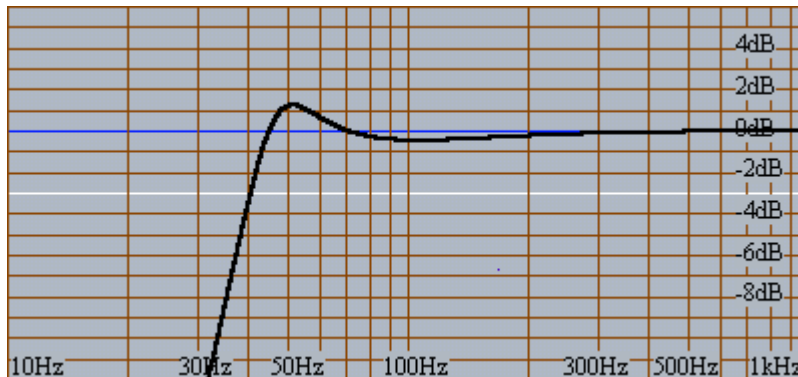
VIFA PL18Wo

Vas : 24,0

Qts : 0,35

Fs : 39,00

A caixa é dutada tem 28 litros e é sintonizada em 45Hz



Repare que apesar do tamanho do alto falante, por ser de boa qualidade, apresenta um F_3 em 40Hz, bem inferior que

o anterior, e seu pico de resposta, discreto, ocorre perto de 50Hz, onde estas frequências costumam em parte ser absorvidas pelo ambiente. Deste modo, o pequeno reforço em 50Hz faz com que este efeito seja compensado e nós ouviríamos uma resposta bastante plana.

Vejamos agora o exemplo de uma caixa para PA full-range (cobre toda faixa de frequências) que a Selênium recomenda para seu falante WPU1505 de 15". Uma caixa para PA deve ter uma boa resposta em toda a faixa de frequências, e um bom rendimento de graves, mas não necessita ser inferior a 45Hz, uma vez que frequentemente irá funcionar em locais ao ar livre onde os graves se dispersam mais e frequências inferiores a isso são absorvidas pela platéia e estofados das cadeiras. Deve ter sim um reforço na faixa de 60 e 70Hz para compensar estas perdas e deve ter boa eficiência. Isto já nos leva a escolha de uma caixa dutada.

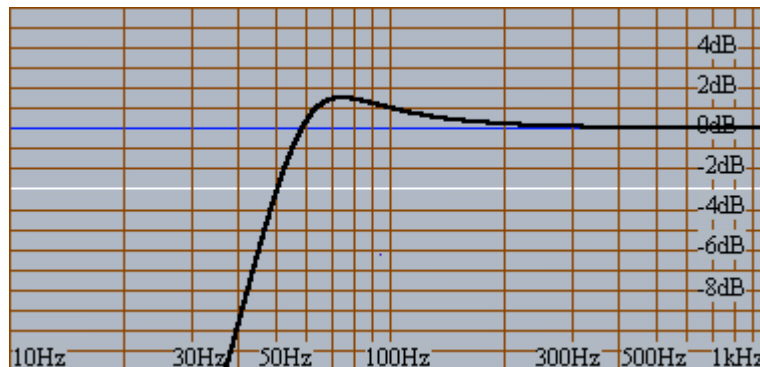
WPU1505

VAS = 162 litros

QTS = 0,35

FS = 38 Hz

O projeto cita que devem ser colocados 2 alto falantes em uma caixa de 177 litros e com 2 dutos de 100mm de diâmetro por 20mm de comprimento (é só um furo na madeira). Ajustando os parâmetros no programa, descobrimos que a frequência de sintonia é próxima de 53Hz e a curva ficou da seguinte maneira:



Como esperávamos, um corte em 50Hz que é muito satisfatório, e um pequeno reforço por volta de 70Hz. Para completar a faixa de frequências, a Selênio recomenda dois tweeters ST302 e uma corneta D300 ou D305, com divisor de frequências (veja apêndice). Estas caixas dutadas com alto-falantes profissionais, quando bem calculadas são responsáveis por aquelas batidas que você sente como um soco no peito.

Por aí vemos que para se fazer o projeto de uma caixa, primeiro deve-se imaginar a utilização que esta caixa vai ter, se será ao ar livre, se o objetivo é dar o máximo de graves, ou se irão trabalhar ao ar livre, se exigirão qualidade, ou se será um meio termo de tudo isto. Após definido isto, deve-se rascunhar a curva de resposta desejada. E o melhor treinamento para isto com certeza é ouvir, ir a shows, campeonatos, lojas, musicais ao vivo, ouvir e observar outros aparelhos, procurar simular a caixa que você ouviu e associar às curvas que você consegue no programa. Após é sair a procura de alto falantes que lhe atendam tanto quanto a preço, quanto tecnicamente.

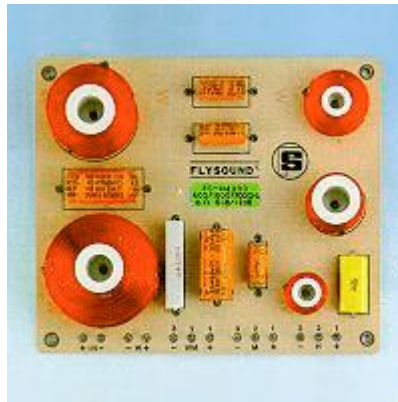
BOA SORTE E BONS PROJETOS!

Apêndices

Apêndice -A

O divisor de freqüências

Como vimos no início desta apostila, existem alto-falantes específicos para cada faixa de freqüências, e é quase impossível que apenas um alto falante reproduza todo o espectro de freqüências audíveis. Como agravante, se um alto falante trabalhar com freqüências abaixo de sua faixa de operação pode-se ocorrer de danificá-lo. Portanto, torna-se necessário um artifício eletrônico para que garanta que todos os alto falantes do sistema receberão as freqüências específicas dentro de suas faixas de operação e ainda que a sobreposição de uma faixa sobre a outra produza efeitos benéficos para o som. O circuito que realiza este trabalho chama-se divisor de freqüências ou crossover.



O crossover, como o da figura acima, é na verdade o que se chama circuito RLC. Ele é composto de resistências (R), indutores ou bobinas (L) e capacitores (C) ligados em associações série e paralelo.

Apesar de já existir no mercado muitos modelos de divisores, este texto vai explicar por alto seu funcionamento e como é feito seu cálculo, pois pode ser que você queira um modelo específico, e a construção destes circuitos não é complicada.

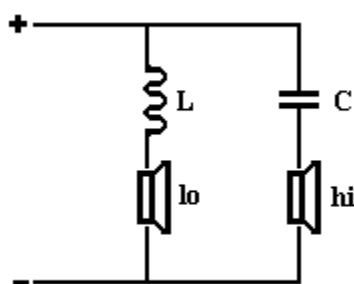
Vimos que toda caixa possui sua curva de resposta, e esta se torna plana em um certo ponto e é desejável que prossiga desta forma por um grande intervalo de frequências. Mas sabemos que se a caixa for dotada somente de um woofer, esta só reproduzirá bem até um certo valor, digamos, 5Khz. Depois, a eficiência começa cair até um ponto que a caixa não reproduz mais. Sabemos que um tweeter poderia reproduzir estas frequências acima de 5000Hz que o woofer não conseguiu e completar a faixa

dinâmica até 20000Hz. Teríamos que dizer ao Woofer para ir parando de tocar suavemente quando a frequência fosse ficando maior que 5KHz e passando a responsabilidade ao tweeter, também suavemente para que o ouvinte não perceba. Queríamos algo parecido com a figura abaixo:



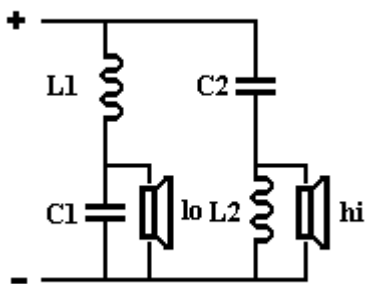
Curvas de respostas dos falantes e resultado
Veja que a soma ou o resultado ficou quase plano

Devemos compreender que em corrente alternada, como são os sinais de audio, os capacitores oferecem baixa resistência a passagem de frequências altas e os indutores oferecem grande resistência a passagem de frequências altas. Por aí podemos imaginar a função do pequeno capacitor que é colocado em série com os tweeters e cornetas automotivos, trata-se de um divisor elementar, onde ele deixa passar somente as frequências altas, mas barra as frequências baixas que podem danificá-los.



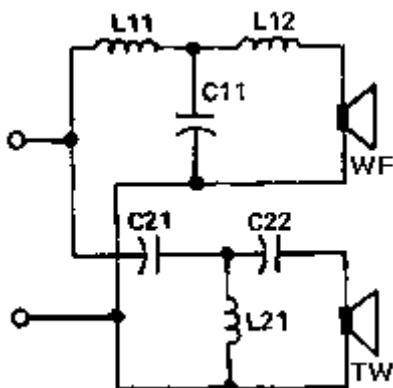
O divisor de 1ª ordem é a montagem mais simples que existe. Trata-se de somente uma bobina em série com o woofer, que filtra os graves e um capacitor em série com o tweeter para filtrar os agudos. Este divisor possui uma taxa de atenuação de 6 dB por oitava, ou seja, o nível do sinal do woofer cai 6dB a cada oitava musical, enquanto o do tweeter eleva. Na frequência de cruzamento, o nível dos dois estão 3dB abaixo da referência. Apesar de ser o preferido devido a suavidade com que realiza a transferência e a sua coerência de fases, este crossover atenua tão devagar as sinais que o tweeter escolhido deve possuir uma faixa de operação que comece, pelo menos, 2 oitavas antes da frequência de corte (cruzamento). E o woofer deve terminar sua faixa de operação 2 oitavas depois.

Obs.: Subir uma oitava corresponde a dobrar a frequência atual. Se você está em 2500Hz, subir duas oitavas corresponde em ir a 5000Hz e depois a 10000Hz. Duas oitavas abaixo de 2500Hz seria $2500/2 = 1250$, $1250/2 = 625$ Hz. Em miúdos, se a frequência de corte for projetada para 2500Hz, o woofer deve ter resposta plana até pelo menos até 10000Hz e o tweeter deve começar sua faixa em 625Hz, tarefa difícil.



O filtro de 2ª ordem atenua duas vezes mais rápido o sinal do que o de 1ª. Agora a taxa é de 12dB/8ª. Se utilizarmos o mesmo exemplo acima, o woofer agora só precisa tocar até 5000Hz e o tweeter deve começar sua faixa de operação em 1250Hz. Como desvantagem, este divisor inverte as fases dos falantes na frequência de corte, isto é, um toca o contrário que o outro, o que resulta em um cancelamento nesta faixa. Inverter a

ligação entre os falantes resolve o problema apenas no cruzamento, pois no restante da faixa o filtro entrega o sinal com a polaridade correta.



O divisor de 3ª ordem (18dB/8ª) é mais complicado de se construir, porém apresenta vantagens sobre os dois anteriores. A sobreposição de frequências dos falantes que ocorria nos outros dois agora pode ser bem menor, menor que uma oitava, e apresenta a mesma coerência de fase que o de 1ª ordem, sendo portanto o mais indicado para caixas de qualidade. Os divisores de

ordem mais alta são muito custosos e de difícil construção, são indicados somente em caixas profissionais onde se deseje um controle minucioso dos falantes. É recomendável que quem queira projetá-los tenha grandes conhecimentos em engenharia elétrica. Comece seu projeto por crossover mais simples e se habitue às limitações que freqüentemente ocorrem. Se quiser conhecer mais sobre crossovers, consulte a bibliografia, existem excelentes trabalhos nacionais sobre o assunto.

Fórmulas para cálculo dos divisores:

Para o filtro de 1ª ordem:

$$C = \frac{1 \times 10^6}{2\pi Z_t f} \text{ micro_Faradays}$$

$$L = \frac{1000 \times Z_w}{2\pi f} \text{ mili_Henries}$$

Onde:

C= capacitância procurada

L= Indutância da bobina procurada

f = frequência de corte

Zw = Impedância do Woofer

Zt= Impedância do tweeter

Para o filtro de 2ª ordem, primeiro se calcula C e L pela fórmula anterior, e segue-se:

$$C1 = 1,4 \times C$$

$$L1 = 1,4 \times L$$

$$C2 = 0,7 \times C$$

$$L2 = 0,7 \times L$$

Procedimento parecido é para o filtro de 3ª ordem:

$$L11 = 1,5 \times L$$

$$C11 = 1,33 \times C$$

$$L12 = 0,5 \times L$$

$$C21 = 0,67 \times C$$

$$L21 = 0,75 \times L$$

$$C22 = 2 \times C$$

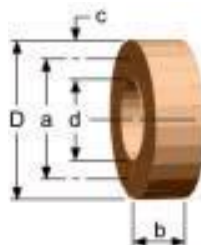
O desafio agora consiste em otimizar o cálculo até encontrar capacitores que existam a venda no mercado ou uma forma fácil de se fazer associações até chegar a um valor.



Quando for comprar capacitores para esta aplicação, compre capacitores de filme plástico ou poliéster, como os da figura. Use capacitores eletrolíticos somente em último caso (neste caso compre dois com o dobro do valor procurado, ligue-os em série unidos pelos pólos negativos). Já os indutores, em geral devem ser construídos. Existe um ótimo programa em português na internet para se calcular indutores, tente procurar por "Calcbob". O cálculo de indutores "na unha" é difícil e perde-se muito tempo para um resultado não tão bom assim.

O indutor é constituído por voltas de fio esmaltado para transformador, enrolados em uma fôrma de material não magnético, o mais compacto e uniforme possível.

Veja este exemplo:



Seguindo a tabela, você terá uma idéia de como construir seu indutor, as letras correspondem as dimensões (desconsidere D, a, c) da figura acima.

Indutância (mH)	Espiras	d(mm)	b(mm)	Resistência do indutor (ohm)	Comprimento do fio (m)	Diâmetro do fio (mm)
0,5	187	12	10	0,5	12,2	0,7
1	251	12	10	0,8	18,5	0,7
2	263	20	20	0,9	30	0,8
3	383	20	20	1,2	38	0,8
5	460	20	20	1,4	55	0,9
7	463	30	30	1,1	73	1,2
9	515	30	30	1,25	85	1,2
11	560	30	30	1,45	96	1,2

Apêndice - B

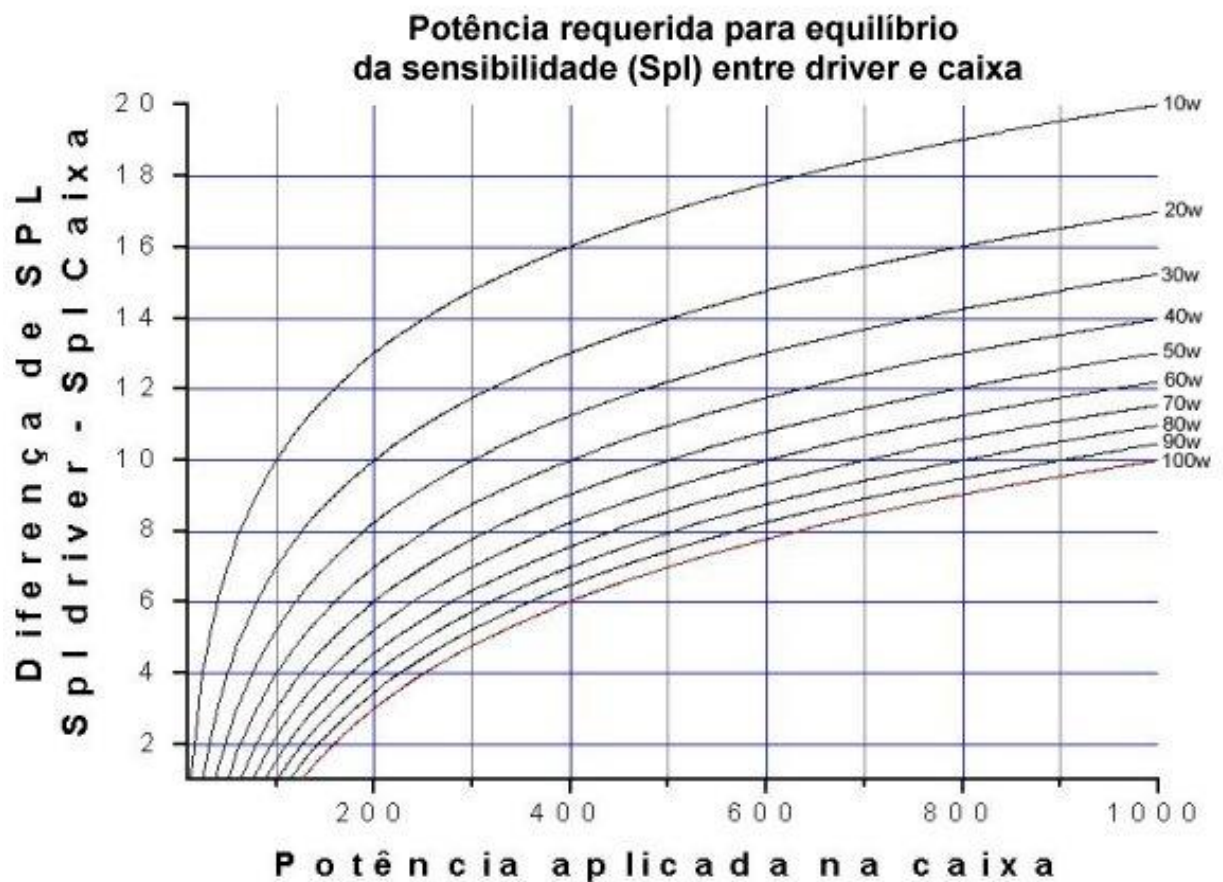
atenuação dos falantes

É muito comum encontrar no meio de sonorização, principalmente automotiva, instalações onde não são respeitados os níveis de potência transferida aos alto falantes. Normalmente os médios e agudos, leia-se cornetas e tweeters, mais cedo ou mais tarde virão a se queimar em virtude das potências elevadíssimas a que são submetidos. Fora este fato, a maior potência produz um desagradável desconforto uma vez que a alta eficiência destes falantes elevará muito a intensidade do médios e agudos. A atenuação se faz necessária nestes casos com a finalidade de reduzir a potência que é transferida ao falante, protegendo-o e nivelando o nível de pressão sonora que este produzirá em relação aos demais transdutores do sistema.

Com a fórmula abaixo você pode encontrar a potência necessária para um correto equilíbrio do sistema em relação aos diferentes níveis de eficiência entre os falantes.

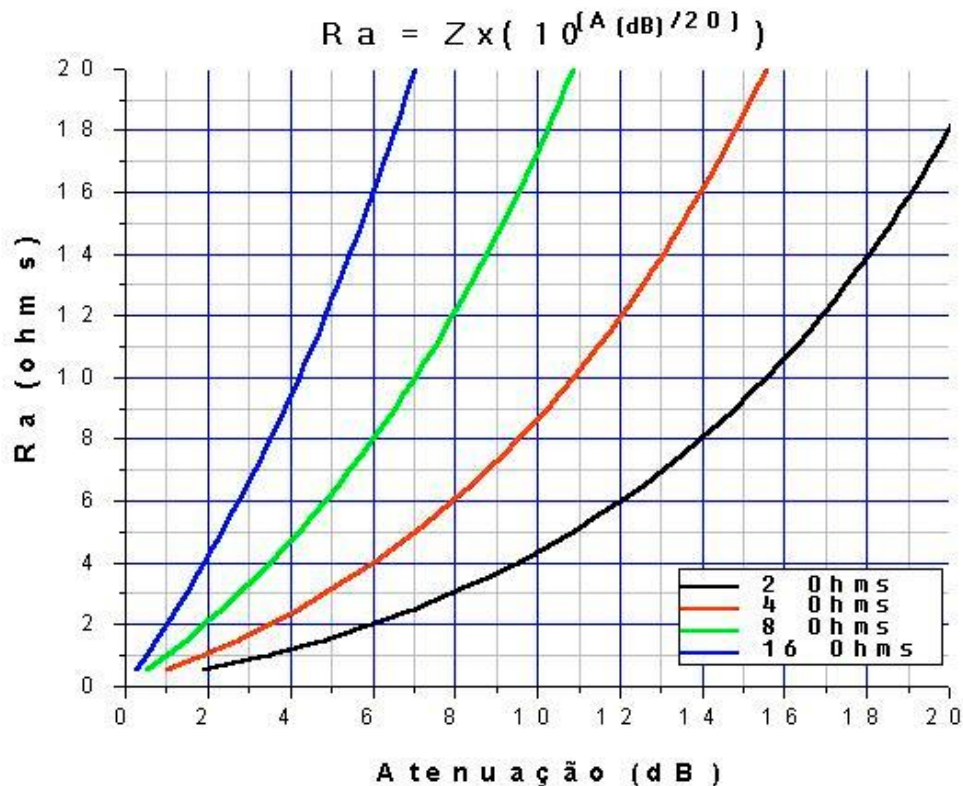
$$P_{\text{aten.}} = 10^{\left(\frac{10 \cdot \text{Log}(\text{Pot. amplificador}) - (\text{Spl corneta} - \text{Spl caixa})}{10} \right)}$$

P_{aten.} É a potência que deverá ser aplicada no driver da corneta ou tweeter para que este produza na mesma intensidade sonora da caixa. Para saber o spl que sua caixa produz a 1W/m basta obter a sensibilidade de seu falante de graves e adicionar 3dB, pode-se deste modo obter uma boa aproximação. Uma forma rápida de conferir esta potência é observar as curvas abaixo.



Para usar o gráfico acima, primeiro saiba a diferença entre as sensibilidades da caixa e da corneta (Spl), e a potência que está sendo aplicada a caixa. Cruze os dois valores e veja qual curva logarítmica passa mais próximo do ponto encontrado. Esta curva é a potência que deve se aplicar ao driver.

De posse da atenuação, deve-se encontrar o valor de R_a (resistência de atenuação), que será posta em série com o falante que se deseja atenuar. Para isso usa-se o gráfico abaixo, onde a atenuação necessária está no eixo X e a resistência R_a se encontra no eixo Y. Use a curva correspondente a impedância de seu driver. Encontre a atenuação necessária no eixo X, suba até que encontre a curva correspondente a impedância do driver e reflita no eixo Y.



Caso o valor que você procura esteja fora da área do gráfico, basta utilizar a fórmula que encabeça cada gráfico para inclusive obter um valor exato.

Segue agora um exemplo de cálculo para facilitar o entendimento:

Suponhamos a caixa dutada construída com dois alto falantes com as seguintes características:

$F_s = 38 \text{ Hz}$
 $p_e = 300 \text{ W rms}$
 $spl = 97 \text{ dB (1w/1m)}$
 $q_{ts} = 0.28$
 $vas = 151 \text{ Litros}$

Uma análise preliminar indicou que a referida caixa produz um pequeno pico que chega a 101dB (1w/1m) em sua faixa de operação, vamos utilizar este valor para nossa análise. Desejamos incluir no sistema duas cornetas para cobrir a faixa de médios. Cada uma possui uma sensibilidade de 109dB(1w/1m) e suporta uma potência de 75W rms.

As duas cornetas possuem juntas uma sensibilidade de 112dB (1w/1m), logo a diferença entre esta sensibilidade e a sensibilidade da caixa é de 11dB. Com esta diferença e a potência

da caixa (600W), podemos observar no gráfico-1 que a potência que queremos está um pouco acima da curva de 50W, tomemos então 55W. Como fizemos os cálculos para as duas cornetas simultaneamente, a potência será $55/2 = 27.5W$ para cada. Já sabemos que a diferença entre as sensibilidades é de 11dB, então, no gráfico-2, vamos retirar o valor de R_a , a resistência que irá em série com cada corneta. Agora vamos considerar as cornetas individualmente, a impedância de cada uma é 8 Ohms por isso a resistência R_a é pelo gráfico igual a 20ohms. Usar resistor com dissipação de potência de pelo menos $0.8 * (75W - 27,5W) = 5,30w$.

=====

Dicas

-Construa caixas dutadas com alto falantes de alta sensibilidade para utilizar em palcos, teatros, instrumentos musicais, trio elétrico automotivo e ao ar livre.

-Uma caixa mal vedada pode perder até 10dB no resultado final, sele bem a caixa por dentro, até mesmo se esta for dutada.

-Softwares que analisam o deslocamento do cone do falante necessitam de mais dados do que simplesmente V_{as} , Q_{ts} e F_s . Repare que os problemas com deslocamento ocorrem em frequências muito baixas, de modo que você pode resolver abaixando um pouco o nível dos graves no aparelho de som.

-Alto falantes pequenos movimentam muito pouca massa de ar, portanto se quiser graves de 40Hz em locais maiores que seu quarto, esqueça os de 5". principalmente se tiverem pouca excursão.

-Se quiser impressionar, procure descobrir a frequência de ressonância do local onde você quer tocar sons graves e construa uma caixa com um pico de resposta nesta frequência. Apesar da batida forte da caixa na região do pico, bom para músicas dançantes, a extensão de graves ficará prejudicada. E a audição prolongada pode causar fadiga devido ao "som de barril".b

-Nas bass-reflex os dutos podem ficar para trás da caixa, desde que você não a encoste na parede. não permita que extremidade interna do duto fique próximo das paredes da caixa (pelo menos um diâmetro de dist.), e o posicione o mais distante possível do alto-falante.

-Carros grandes, do tipo tres volumes, não transferem bem os graves do porta-malas para o interior do veículo. O ideal é construir uma caixa band-pass, coloca-la no porta-malas e fazer uma passagem para comunicar o duto com o habitáculo.

-Quando dois ou mais alto falantes estão ligados juntos, lembre-se de observar a impedância resultante, para que seja compatível com a impedância de amplificador. Veja o link nº 23

-Se os alto falantes estiverem ligados juntos, via divisor de frequências, Ex: um tweeter, um woofer e um mid-range, todos de 8ohms de impedância, a resultante também será 8ohms pois devido ao divisor, o amplificador "enxerga" cada falante individualmente.

-Músicas populares possuem suas batidas graves perto de 70Hz, ao projetar caixas que toquem ao ar livre e locais amplos, procure criar um pico de no máximo 4dB nesta região.

-Amplificador mais potente que o alto falante não é problema (aliás é o correto), o pior é amplificador fraco que distorce em altos volumes. A distorção aquece as bobinas e queima fácil os falantes.

-Para a ligação interna da caixa, use cabos de bitola coerente com a potência do falante.

-Não coloque nada no duto que interrompa a passagem do ar, nem mesmo telas. Não deixe também material absorvente próximo a extremidade interna do duto, nem em seu interior.

Se você se interessa por estes assuntos e caso queira se aprofundar mais nesta área fascinante que inclui até mesmo conhecimentos de psico-acústica, recomendo que consulte estas referências e endereços web abaixo. Selecionei os melhores sites sobre o assunto para que aqui você não fique sem respostas e quem sabe, descubra se esta é realmente sua vocação. Prepare um lanche, o refrigerante, e se vá navegar:

LINKS IMPORTANTES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Fabricantes de alto-falantes:

- | | |
|-----------------|---|
| 1. Selenium(br) | www.selenium.com.br |
| 2. JBL | www.jbl.com e www.jblpro.com |
| 3. Bravox(br) | www.bravox.com.br |
| 4. Bravox USA | www.bravoxaudio.com |
| 5. Bomber(br) | www.bomber.com.br |
| 6. VIFA | www.ampslab.com |
| 7. Audax | www.audax.com |
| 8. Snake | www.snakepro.com |

Fabricantes de caixas:

- | | |
|---------------|--|
| 9. Castle | www.castle.uk.com |
| 10. B&W | www.bwspeakers.com |
| 11. Tannoy | www.tannoy.com |
| 12. Staner | www.staner.com |
| 13. Dynaudio | www.dynaudio.com |
| 14. Klipsch | www.klipsch.com |
| 15. Behringer | www.behringer.com |

Sites sobre o assunto:

- | | |
|---------------------------------|--|
| 16. Basic car audio | www.bcae1.com |
| 17. Audio HiFi DIY | www.audio-nova.com/Innehall/audionova_DIY.htm |
| 18. Audio HiFi | www.members.tripod.com/nanhifi |
| 19. DIY subwoofers | www.diysubwoofers.org |
| 20. EPanorama | www.epanorama.net |
| 21. Audio List(br) | www.audiolist.cjb.net |
| 22. Autosom (artigos) (br) | www.autosom.net |
| 23. Associação de falantes(br) | www.bravox.com.br/textostecnicos_associacoes.asp |
| 24. Speaker building | www.speakerbuilding.com |
| 25. Dicas sobre audio(br) | www.infobrasilia.com.br/som1.htm |
| 26. Curso de acústica(br) | email.feb.unesp.br/~jcandido/acustica/ |
| 27. Informações gerais(br) | www.paginadosom.com.br |
| 28. Softwares para calculo | www.speakerbuilding.com/software |
| 29. Projetos e artigos HiFi(br) | www.geocities.com/CapeCanaveral/9096/lt.htm |
| 30. Glossário(br) | www.performancenet.com.br/glossario.htm |
| 31. STUDIOR – artigos(br) | www.studior.com.br/suporte.htm |

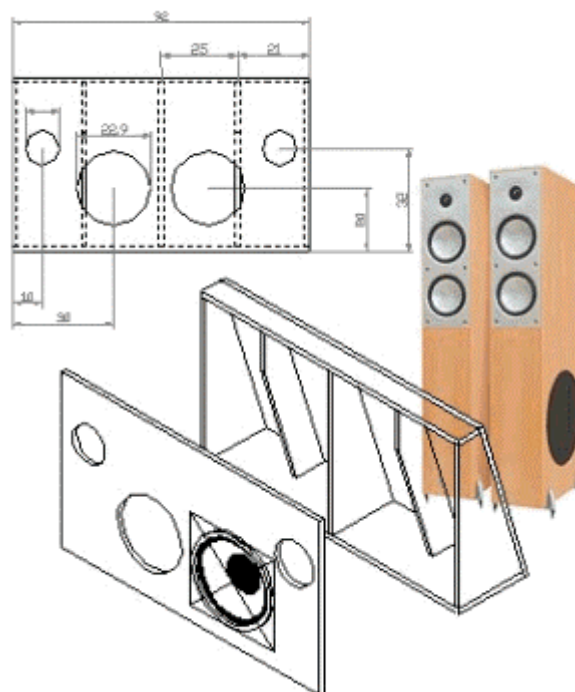
Sobre divisores de frequencia:

(veja também nos links: 1 e 31)

- | |
|--|
| 32. www.bcae1.com/xoorder.htm |
| 33. www.the12volt.com/caraudio/cross.asp |
| 34. www.termpro.com/articles/xover2.html |

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA:

1. DICKASON, Vance - Caixas Acústicas e Alto-Falantes - ed: H. Sheldon
2. JBL PROFESSIONAL - Sound System Design Reference manual - disponível em www.jblpro.com
3. MIROL, Victor A. - A janela sonora e as palavras que a definem - disponível na WEB em www.clubedoaudio.com.br/metodo.htm
4. SELENIUM ALTO-FALANTES - Projetos de sonorização - disponível na WEB em www.selenium.com.br
5. SETTE, Homero - Análise e síntese de sistemas de radiação direta pelo método de Thiele-Small - Revista Saber Eletrônica Nº 228 - 231 – 1992
6. STUDIO R - Interface amplificador falante em regime de alta potência – disponível em www.studior.com.br/aes2000.pdf



FAÇA VOCÊ MESMO:

CAIXAS ACÚSTICAS DE
QUALIDADE SUPERIOR

**CAIXAS SELADAS - DUTADAS
SUBWOOFER
PARA O CARRO, CASA, TEATROS,
SHOWS, ETC**

Ademir Gonçalo Júnior

**Peça mais cópias em:
www.aerodinamica.hpg.com.br**