

ALTO-FALANTES E CAIXAS ACÚSTICAS, CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO

Carlos Correia da Silva e Homero Sette Silva

ELETRÔNICA SELENIUM S.A.

BR 386, Km 435.

CEP 92480-000 Nova Santa Rita, RS - Brasil

<http://www.selenium.com.br> horny@terra.com.br homero@selenium.com.br

Resumo - Este documento tem por objetivo fornecer uma orientação básica para a utilização de alto-falantes e caixas acústicas. Os aspectos fundamentais desses componentes são abordados de forma introdutória, a título de fornecer uma visão geral do assunto. Suas características, limitações e utilização típica são abordados de forma resumida.

Abstract - This document was written with the purpose of providing the basic guidelines for the use of raw drivers and loudspeakers. These components are discussed as an introductory basis. Their main characteristics and shortcomings are also addressed in brief.

1 - INTRODUÇÃO

Os alto-falantes eletro dinâmicos são dispositivos que para serem usados com sucesso necessitam que suas características básicas sejam bem conhecidas pelo projetista e também pelo usuário.

Frágeis, e com baixo rendimento eletro acústico, transformam em calor quase toda a energia elétrica que recebem dos amplificadores, isto acontecendo na grande maioria dos casos.

Para cumprirem adequadamente o fim a que se propõem, ou seja, a conversão de energia elétrica em acústica, múltiplos e variados aspectos devem ser observados.

Para evitar sua destruição durante o uso, dois problemas fundamentais devem ser equacionados e resolvidos:

1 – O térmico, garantindo que o calor gerado na bobina será adequadamente trocado com o meio circundante, para evitar o super aquecimento, capaz de carbonizar a bobina móvel;

2 – O deslocamento excessivo do cone, que tende a assumir valores muito elevados quando da aplicação de altas potências, problema que é acentuadamente agravado nas baixas frequências.

Além disso, os requisitos de resposta de frequência e direcionalidade são da maior relevância e devem também ser atendidos adequadamente.

Nas instalações em locais públicos, a proteção contra intempéries e vandalismo constitui aspecto da mais alta relevância e, não raramente, restringem significativamente o leque de possibilidades nas mãos do projetista.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Diâmetro nominal	380 mm / 15"
Impedância nominal	8 Ω
Impedância mínima @ 190 Hz	7,7 Ω
Potência de Programa Musical	900 W
Potência RMS (NBR 10303)	450 W
Sensibilidade (1W/1m média 100-2000 Hz)	97 dB SPL
Compressão de potência @ 0 dB (pot. Nom.)	2,5 dB
Compressão de potência @ -3 dB (pot. Nom.)/2	1,7 dB
Compressão de potência @ -10 dB (pot. Nom.)/10	0,1 dB

PARAMETROS DE THIELE-SMALL

Fs (frequência de ressonância mecânica)	36 Hz
Vas (volume equivalente do falante)	163 L
Qts (fator de qualidade total)	0,39
Qes (fator de qualidade elétrico)	0,40
Qts (fator de qualidade mecânico)	14,70
η_o (eficiência de referencia em meio espaço)	2,00 %
Sd (área efetiva do cone)	0,0814 m ²
X _{MAX} (deslocamento máximo p-p c/ 10% distorção)	4,5 mm
Vd (volume deslocado = Sd x X _{MAX})	350 cm ³
X _{LIM} (deslocamento máximo de pico antes do dano)	9,0 mm
Condições Atmosféricas no Local da Medição:	
Temperatura	24 °C
Pressão atmosférica	1005 mb
Umidade relativa do ar	63 %

PARAMETROS ADICIONAIS

βL (fator de força)	20,5 T · m
Densidade de fluxo no gap	1,1 T
Diâmetro da bobina	100 mm
Comprimento do fio da bobina	29,7 m
α_{25} (coeficiente de temp. da bobina)	0,00388 1/°C
Temperatura máxima da bobina	230 °C
θ_{VC} (temp. máx. da bobina/potência Máx.)	0,51 °C/W
H _{VC} (altura do enrolamento da bobina)	18,0 mm
H _{AG} (altura do gap)	9,5 mm
R _E (resistência ôhmica da bobina)	6,7 Ω
Mms (massa móvel)	108,7 g
Cms (compliance mecânica da suspensão)	175,8 μ m/N
Rms (Resistência mecânica da suspensão)	1,7 Kg/s

PARAMETROS NÃO LINEARES

Le @ Fs (indutância da bobina em Fs)	4,143 mH
Le @ 1 kHz (ind. da bobina em 1 kHz)	1,321 mH
Le @ 20 kHz (ind. da bobina em 20 kHz)	0,471 mH

Red @ Fs (resistência de perdas em Fs)	0,29 Ω
Red @ 1kHz (resist. de perdas em 1 kHz)	0,29 Ω
Red @ 20kHz (resist. de perdas em 20 kHz)	0,29 Ω

Krm (coeficiente de resistência de perdas)	3,832 m Ω
Kxm (coeficiente da indutância da bobina)	26,845 mH

Erm (expoente da resistência de perdas)	0,798
Exm (expoente da indutância da bobina)	0,656

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Material do ímã	Ferrite de bário
Peso ímã	2,640 g
Diâmetro x altura do ímã	200 x 24 mm
Peso do conjunto magnético	7,8 Kg

Material da carcaça	Alumínio injetado
Acabamento da carcaça	Pintura epóxi preta
Acabamento das arruelas	Cromatização azul

Material do fio da bobina	Cobre
Material da fôrma da bobina	Poliamida (Kapton®)

Material do cone	Celulose de fibras longas
------------------	---------------------------

Volume ocupado pelo falante	6,0 L
Peso liquido do falante	11,08 Kg
Peso total com embalagem	11,50 Kg
Dimensões da embalagem (C x L x A)	40x40x18,5 cm

INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM

Número de furos de fixação	8
Diâmetro dos furos de fixação	8,0 mm
Diâmetro do círculo do furos de fixação	373 mm
Diâmetro do corte para montagem frontal	355 mm
Diâmetro do corte para montagem traseira	345 mm

Tipo do conector	Pressão para fio nu
Polaridade: Tensão + no borne vermelho, desl. p/frente	
Dist. min. do fundo do falante à parede da cx.	75 mm

Tabela 1 – Características do falante WPU1505.

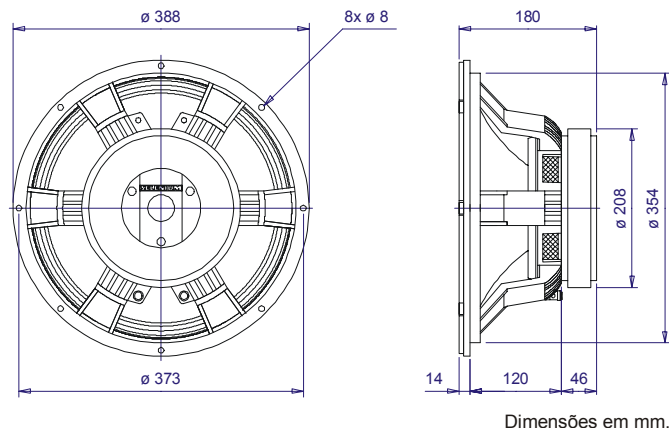


Fig. 1 – Representação Dimensional

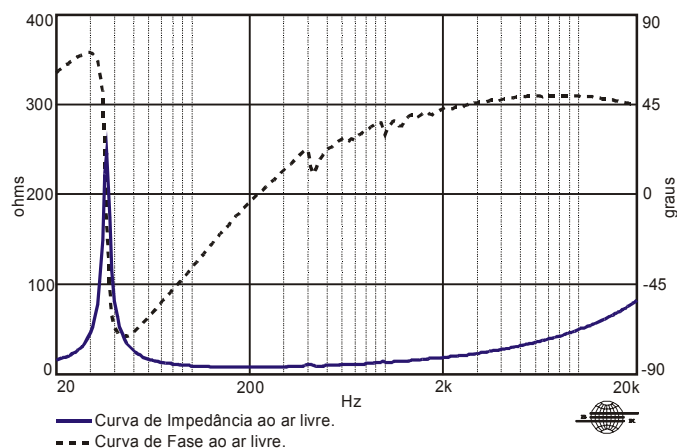


Fig. 2 – Curvas do módulo da impedância e da fase com o alto-falante ao ar livre

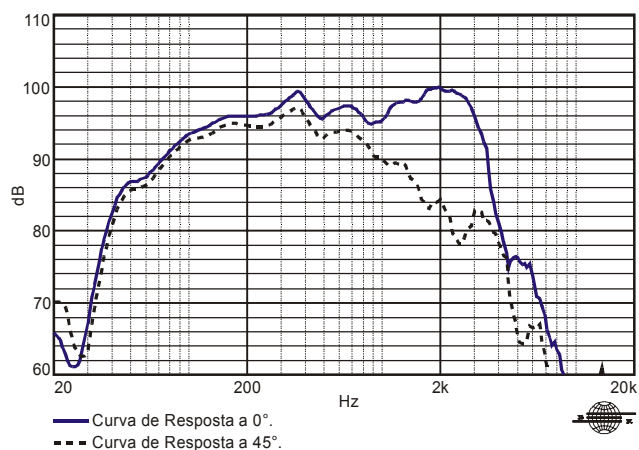


Fig. 3 – Respostas em amplitude, em caixa refletora de graves, no eixo e a 45°.

2 - MONTAGEM

Na **Fig. 1**, vemos a representação dimensional do alto-falante usado na argumentação que se segue.

Consultando a **TABELA 1**, vemos em INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM, que existem duas possibilidades: a instalação frontal e a traseira.

Na montagem traseira, o falante é aparafusado por trás do painel da caixa. Esta opção tem a vantagem de beneficiar-se da guarnição do alto-falante, ou seja, um anel de material maleável, que circunda a borda da carcaça, permitindo um bom acoplamento mecânico entre esta e o painel da caixa, reduzindo as vibrações para ela transmitidas e garantindo uma melhor vedação, eliminando os vazamentos de ar que podem ocorrer quando a borda metálica entra em contato direto com a madeira.

É exatamente isso que ocorre na chamada montagem frontal, preferida pela comodidade de não necessitar que uma abertura de visitação seja feita na caixa.

No caso da montagem frontal, uma junta de material flexível deve ser providenciada pelo instalador, no sentido de evitar os problemas acima descritos.

Fixação

Alto-falantes profissionais, como o do exemplo, que conforme a **TABELA 1** pesa 11 kg, devem ser fixados no painel da caixa com parafusos de máquina (e não de rosca soberba, usados em madeira), com cabeça sextavada (para ser apertado com chave de boca) e porca garra rosqueada, que com o aperto, será cravada na madeira. Desse modo, além de uma fixação perfeita, o falante poderá ser removido para manutenção e testes quantas vezes forem necessárias, sem o perigo de escarear o orifício. Se possível, use chave de torque para evitar pressão excessiva. Pressões excessivas, principalmente em falante de carcaça de chapa, podem deformá-la chegando até a prejudicar o deslocamento da bobina.

Inicialmente, os parafusos devem ser apertados levemente, apenas o suficiente para uma acomodação correta. Em seguida, os parafusos situados em lados opostos devem ser apertados com firmeza. Por último deve-se verificar se todos estão apertados adequadamente.

Furação

O corte no painel para a instalação do falante, bem como a abertura dos furos para os parafusos de fixação, devem ser feitos com todo o cuidado, utilizando as informações dimensionais fornecidas pelo fabricante.

O alto-falante deve entrar justo em seu berço, mas sem a necessidade de esforço.

O corte deve ser limpo, sem rebarbas nem lascas na madeira, de modo a não permitir vazamentos de ar. Se necessário, use algum tipo de massa de calafetar.

Depois de montado o falante na caixa, vazamentos podem ser facilmente percebidos com as costas das mãos (ou a pele do rosto), através do deslocamento de ar, aplicando-se um sinal senoidal entre 20 e 40 Hz, com amplitude suficiente.

Furos para a passagem de fios, mesmo que de uma câmara para outra, na mesma caixa, devem ser perfeitamente calafetados, assim como aqueles para os conectores, e todos os demais por ventura existentes. Vazamentos de ar comportam-se de modo resistivo, transformando energia acústica em calor, diminuindo o rendimento da caixa. Já grandes aberturas, como aquelas usadas nos dutos de sintonia, são predominantemente indutivas e além de não introduzirem perdas significativas, permitem sintonizar o volume de ar encerrado na caixa, que é capacitivo, em uma frequência determinada, constituindo o chamado ressonador de Helmholtz. Nesta frequência de sintonia a componente acústica no duto é máxima e está em fase com a produzida pelo cone do falante, daí o reforço nas baixas frequências, característico das caixas refletoras de graves (*bass reflex*).

Madeira

A madeira a ser usada na construção de caixas acústicas deve ser o mais densa possível, para evitar vibrações. Vibrações nas paredes da caixa originam sinais distorcidos e defasados, produzidos por um transdutor extremamente ineficiente: os painéis da caixa.

A caixa acústica de um violão deve produzir som, mas a caixa acústica que vai abrigar um alto-falante tem que se limitar a reproduzir som, o mais fielmente possível.

Madeiras reconstituídas (compensados e aglomerados) são geralmente mais densas que as madeiras naturais. Além disso o compensado multilaminado possui fibras ortogonais em cada lamina, o que o torna mais rígido.

O uso de concreto ou alvenaria pode ser uma excelente solução para grandes sub woofers usados nos cinemas ou em sistemas de *home cinema*.

As paredes laterais das caixas de madeira devem ser reforçadas internamente por sarrafos, aplicados no sentido da maior dimensão, mas que não devem ser colocados no meio do painel, pois assim as duas metades teriam o mesmo modo de vibração.

Conectores

A ligação de uma caixa acústica com o amplificador que vai alimentá-la deve ser feita por um conector apresentando um contato firme, com baixa resistência elétrica, mesmo na presença das vibrações produzidas pela caixa.

Além disso, não pode permitir a existência de vazamentos de ar. Os conectores do tipo *speakon* preenchem esses requisitos e estão disponíveis para diversos números de vias.

Acabamento

Além dos aspectos estéticos, o acabamento deve ser condizente com a aplicação a que se destina a caixa. No caso de caixas profissionais, esse acabamento deve protegê-la da chuva e suportar os inevitáveis choques no transporte, não sendo lisa a ponto de escorregar das mãos com facilidade nem áspera demais a ponto de ferir os carregadores.

Alças, rodízios e outros dispositivos que facilitem o transporte são muito recomendáveis.

3 - TEMPERATURA

A temperatura ambiente afeta diretamente o comportamento do alto-falante, seja pela alteração que produz em seus parâmetros ou pela modificação que ocasiona na troca do calor gerado na bobina, com o meio.

No caso do falante do exemplo, seus parâmetros foram medidos a 24 °C. Se esta temperatura subir 10 graus centígrados, a resistência R_E sofrerá uma alteração de 6,7 ohms para 6,96 ohms, o que corresponde a um acréscimo de 3,8 %. Como o parâmetro Q_{es} é diretamente proporcional a R_E , devemos esperar uma elevação de igual proporção em seu valor, indo então para 0,415. Q_{ts} também sofrerá um acréscimo, mas não na mesma proporção, subindo para 0,404.

$$\frac{R_B}{R_A} = 1 + \frac{T_B - T_A}{T_A - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}}} \quad (1.1)$$

$$Q_{es} = \frac{R_E \cdot \sqrt{M_{ms}/C_{ms}}}{(\beta L)^2} \quad (1.2)$$

$$Q_{ts} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{es}} + \frac{1}{Q_{ms}}} \quad (1.3)$$

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{M_{ms}/C_{ms}}}{R_{ms}} \quad (1.4)$$

No entanto, o efeito mais notável é aquele decorrente da elevação da temperatura na bobina, provocada pela potência nela aplicada. Conforme a **TABELA 1**, a máxima temperatura suportada pela bobina, no caso do falante em questão, é igual a 230 °C. Quando este valor for atingido, R_E sofrerá um acréscimo de 80%, em relação ao seu valor original, a 24 °C, subindo para 12,08 ohms. Essa brutal elevação na resistência da bobina além das alterações nos fatores de qualidade Q_{es} e Q_{ts} , provocará uma redução da eficiência, ocasionando a chamada compressão de potência.

4 - EFICIÊNCIA

A eficiência do processo de conversão eletro-acústico é dada pelo cociente entre a potencia acústica obtida e a potencia elétrica aplicada.

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} \quad \therefore \quad P_A = \eta \cdot P_E \quad (1.5)$$

A eficiência de referencia η_o serve para facilitar a comparação entre diferentes alto-falantes, sendo um valor particular de η , que ocorre em duas frequências, conforme mostra a **Fig. 4**, podendo ser calculada pelos parâmetros T-S.

$$\eta_o = \frac{\rho}{2\pi C} \cdot \left(\frac{S_d}{M_{ms}} \right)^2 \cdot \frac{(\beta L)^2}{R_E} \quad (1.6)$$

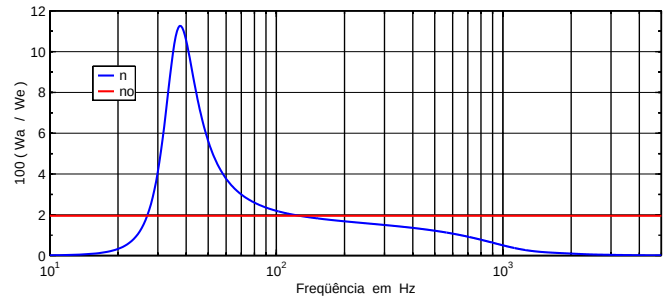


Fig. 4 – A eficiência η e a de referencia, η_o .

Para as condições atmosféricas no local da medição, dadas pela **TABELA 1**, temos para a densidade do ar e a velocidade do som, respectivamente, os seguintes valores:

$$\rho = 1,1731 \text{ Kg/m}^3 \quad (1.7)$$

$$C = 346,60 \text{ m/s} \quad (1.8)$$

que, juntamente com os demais parâmetros, levam a $\eta_o = 1,9 \%$, valor muito próximo daquele fornecido pela **TABELA 1**.

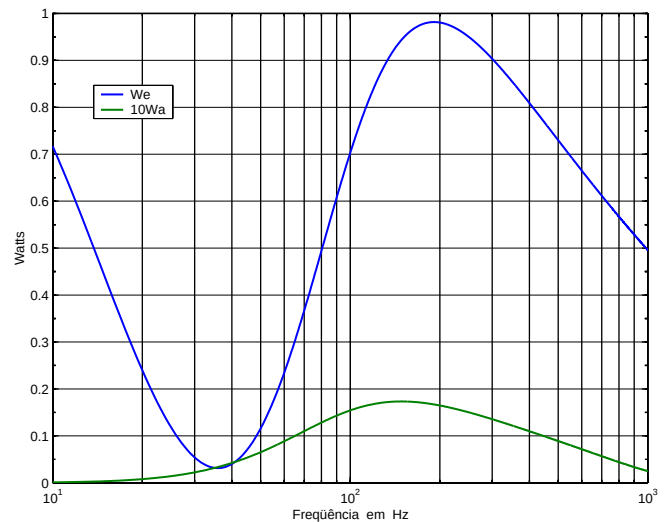


Fig. 5 – Potencias elétrica e acústica (x10) para 2,83 V.

Na **Fig. 4** podemos observar que a eficiência, na ressonância, atinge valores extremamente elevados. No entanto, a potência acústica ali produzida é muito baixa. Isto acontece devido ao pico na curva da impedância, fazendo com que a potência elétrica absorvida seja muito baixa. Desse modo, a eficiência elevada, na ressonância mecânica deve-se à pouca absorção de potência elétrica e não a uma potência acústica elevada, conforme podemos ver na **Fig. 5**.

Devemos também mencionar que uma tensão igual a 2,83 V, que corresponde a 1 Watt em uma resistência de 8 ohms, quando aplicada em um alto-falante, só produzirá aquela potência em frequências muito baixas ou nas vizinhanças da impedância nominal, como mostra a **Fig. 5**. Assim sendo, devemos evitar a expressão “SPL @ 1 W/m” e utilizar “SPL @ 2,83 V/m”, se for este o caso.

Se quisermos aplicar uma potência constante igual a 1 Watt, deveremos fornecer a tensão mostrada na **Fig. 6**, que na ressonância assumirá um valor muito elevado, devido ao alto valor da impedância, nesta frequência.

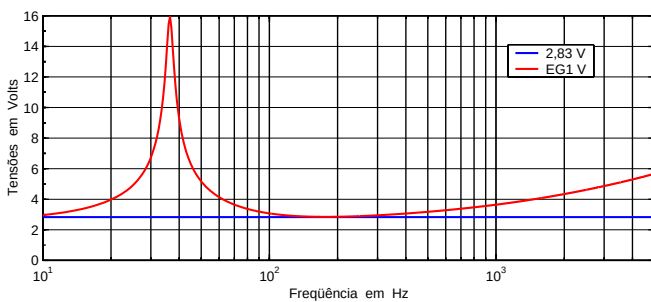


Fig. 6 – Tensão EG1 capaz de aplicar 1 Watt na bobina.

5 - COMPRESSÃO DE POTÊNCIA

Se dobrarmos a potência aplicada a um alto-falante devemos esperar que a pressão acústica dobre, ou seja, que experimente um acréscimo de 3 dB. Se, por exemplo, ao invés de 3 dB constatarmos um acréscimo de apenas 0,5 dB, a diferença $3 - 0,5 = 2,5$ dB é a chamada compressão de potência.

Podemos entender este fato da seguinte maneira: o acréscimo na potência aplicada elevou a temperatura da bobina, aumentando sua resistência. Como a eficiência é inversamente proporcional a R_E , esta diminui.

A variação de R_E , na faixa de temperatura que vai daquela onde os parâmetros foram medidos até a máxima suportada, pode ser calculada conforme abaixo:

$$\frac{R_B}{R_A} = 1 + \frac{230 - 24}{24 - 25 + \frac{1}{0,00388}} = 1,80 \quad (1.9)$$

Sendo a compressão de potência estimada em

$$10\text{Log}_{10}(1,8) = 2,5 \text{ dB} \quad (1.10)$$

Se a temperatura da bobina ultrapassar o valor máximo especificado, muito provavelmente o alto-falante será danificado. Caixas acústicas expostas diretamente ao sol podem apresentar temperaturas internas em torno de 80 °C, e isto com o amplificador desligado. Seguramente, nessas condições, um alto-falante que foi testado e especificado em 25 °C, só poderá dissipar uma potência muito menor. Uma coisa é a bobina trocar calor com o ar a 25 °C e outra, bem diferente, com este a 80 °C.

Em trabalho apresentado por Ruy Monteiro [1] foi apontado um método bastante prático para solucionar este problema, que consiste na colocação de uma chapa metálica, de ferro ou alumínio, em substituição a uma área, originalmente em madeira.

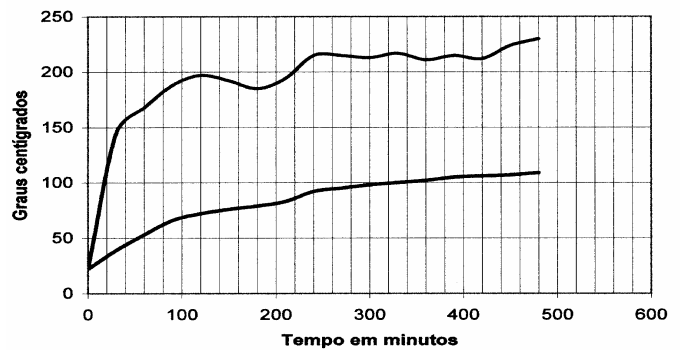


Fig. 7 – Variação das temperaturas na bobina (superior) e na carcaça, na caixa sem placa metálica.

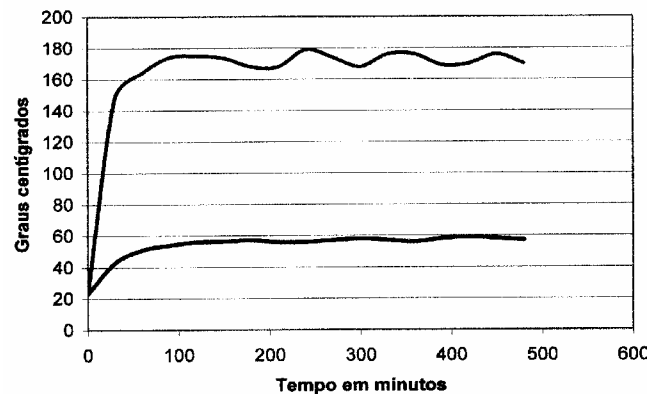


Fig. 8 – Variação das temperaturas na bobina (superior) e na carcaça, na caixa com placa metálica.

“Na **Fig. 7** vemos o curso da temperatura da carcaça e a correspondente temperatura da bobina do falante, na sua forma original, com má dissipação. Note que depois de 480 minutos de operação a temperatura da carcaça ainda não tinha estabilizado e a temperatura da bobina já havia atingido uma temperatura perigosa de 240 graus.

Na **Fig. 8** vemos o curso da temperatura da carcaça e a correspondente temperatura da bobina do falante na caixa com dissipador. Note que depois de 120 minutos de operação, a temperatura da carcaça já havia estabilizado em 60 graus e a temperatura da bobina em 170 graus, permanecendo estável até o final do teste.”

6 - IMPEDANCIA DA BOBINA

A impedância da bobina de um alto-falante é composta não apenas pelas resistências e reatâncias dos componentes ali existentes fisicamente como também por aqueles localizados em outros pontos, mas que se refletem na bobina móvel.

Assim, componentes residindo no lado mecânico, ou no lado acústico, vão influenciar na corrente circulando pela bobina, através de seus “reflexos”, tal como em um transformador, onde a corrente no primário depende da carga aplicada no secundário, uma vez que esta se reflete no primário proporcionalmente ao quadrado da relação de espiras, ou seja, $(N_p / N_s)^2$, ou S_d^2 no caso do falante.

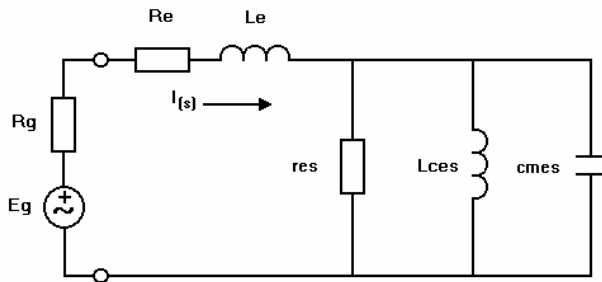


Fig. 9 – Componentes acústicos e mecânicos concentrados no lado elétrico.

A **Fig. 9** representa o circuito equivalente de um alto-falante ao ar livre, ou montado em um baffle infinito.

A primeira ressonância, ou ressonância mecânica, que corresponde ao pico da impedância na **Fig. 2**, é determinada pela equação (1.11).

$$F_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{mes} \cdot L_{ces}}} \quad (1.11)$$

A segunda ressonância, indicadora da impedância nominal (impedância mínima, acima de F_s) é principalmente determinada pela indutância da bobina L_e e pela capacitância C_{mes} , resultante da reflexão das massas existentes no lado mecânico.

Como podemos ver, a impedância vista para dentro dos terminais da bobina móvel do alto-falante só se torna razoavelmente constante nas vizinhanças da impedância nominal.

Alem da variação em amplitude, temos a variação da fase da impedância que é positiva (comportamento indutivo) abaixo da ressonância mecânica, nula (comportamento resistivo) nas duas ressonâncias, negativa (comportamento capacitivo) entre as duas ressonâncias e positiva daí em diante.

Na região capacitiva, devido à corrente adiantar-se em relação à tensão, podemos ter durante uma passagem musical elevados valores de corrente, com tensão nula, o que poderá ser interpretado pelo amplificador como um curto circuito, o que pode ter para ele consequências catastróficas devido à atuação errática do circuito de proteção contra curto.

Um fato digno de menção é o efeito de semi-indutor que caracteriza a impedância, nas altas frequências. Na **Fig. 2**, podemos ver que a impedância tende para 45° (metade de 90° , vindo daí o termo “semi” indutor) nas altas frequências.

Isto se deve ao seguinte fato: nas altas frequências, a impedância da bobina deveria ser puramente indutiva e função da indutância L_e . Acontece que uma componente resistiva, denominada Red , originada pelas perdas na ferragem do alto-falante, cresce com a frequência e se aproxima, em módulo, à reatância de L_e , originando o ângulo de 45° .

As componentes não lineares Red , que aumenta com a frequência, e a indutância L_e , que diminui com a frequência, são dadas pelas equações (1.12) e (1.13), respectivamente.

$$Red = K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}} \quad (1.12)$$

$$L_e = K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm}-1)} \quad (1.13)$$

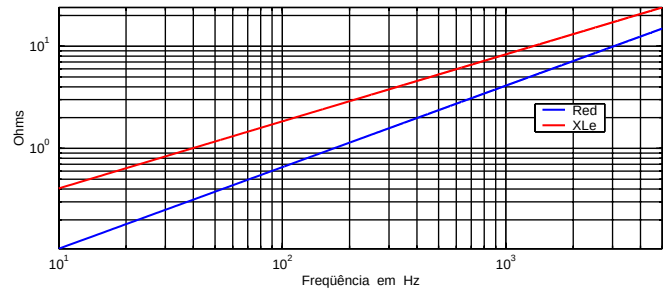


Fig. 10 – Componentes não lineares Red e XLe .

7 - POTÊNCIA

A potência que um alto-falante pode suportar, sob o ponto de vista térmico, depende da troca de calor efetuada com o meio que o envolve. Devido ao baixo rendimento, característica intrínseca aos falantes eletrodinâmicos, quase toda a potência elétrica aplicada é transformada em calor. No caso do falante que estamos usando como exemplo, dada sua eficiência de 2%, para cada 100 Watts aplicados na bobina 98 Watts são transformados em calor e apenas 2 Watts em potência acústica.

Quanto maior a área da bobina, melhor será a troca de calor entre esta e o conjunto magnético.

NBR 10303

A Norma Brasileira 10303 utiliza o ruído rosa como sinal de teste. Para que a densidade espectral do sinal de ruído fique semelhante à de um sinal musical, a norma especifica um filtro para esta finalidade, cuja função de transferência está mostrada na **Fig. 11**, e que não deve ser confundido com o filtro utilizado para converter um sinal de ruído branco em ruído rosa. Além disso, um circuito limitador a diodo é incorporado, para eliminar os picos superiores a 6 dB.

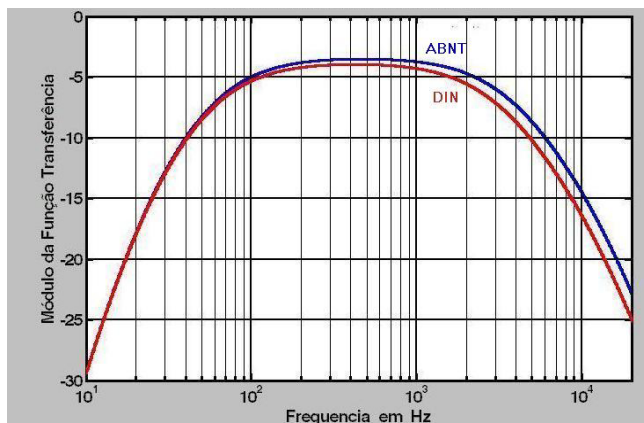


Fig. 11 – Funções de transferência dos filtros ABNT e DIN.

Segundo a norma 10303, o falante em teste deve ser submetido a um período de duas horas recebendo o sinal de ruído rosa filtrado, com a potência especificada. A tensão aplicada no falante deverá ser igual à raiz quadrada do produto da potência especificada vezes a impedância nominal.

$$E_{rms} = \sqrt{P \cdot Z_N} = \sqrt{450 \cdot 8} = 60 \text{ V} \quad (1.14)$$

PROGRAMA MUSICAL

Como o valor RMS resulta de uma média (quadrática), isto significa que na informação musical, que resultou nesta média, existiram momentos em que a potência instantânea foi menor que a média e outros em que esta a superou.

Desse modo, se o amplificador fosse dimensionado para uma potência igual ao valor RMS especificado, os picos do sinal seriam ceifados, o que originaria distorção e redução da faixa dinâmica. Esta distorção harmônica é a responsável pela queima de drivers, tweeters e até woofers, quando alimentados por amplificadores subdimensionados. Menos potência no amplificador, contrariando o sendo comum, é mais perigoso que potência alta.

Para um falante, capaz de suportar 450 Watts, deveríamos escolher um amplificador apto a fornecer 900 Watts, ou mais. Na média, a potência não poderia ultrapassar os 450 Watts, mas, nos picos, esse valor poderia ser muitas vezes maior. A música possui uma faixa dinâmica muito elevada.

Para que a música possa ser reproduzida com uma faixa dinâmica pelo menos próxima da original é necessário que os amplificadores possuam uma capacidade de potência muito superior à potência média do alto-falante.

Operar um sistema de som com essas características vai exigir alguma forma de supervisão eletrônica para limitar o sinal, quando necessário, de modo que a potência média do alto-falante não seja ultrapassada.

Na **Fig. 12** [1] vemos um sinal de ruído rosa, filtrado na faixa de sub graves, onde podemos perceber que os picos existentes no sinal ultrapassam significativamente o valor médio.

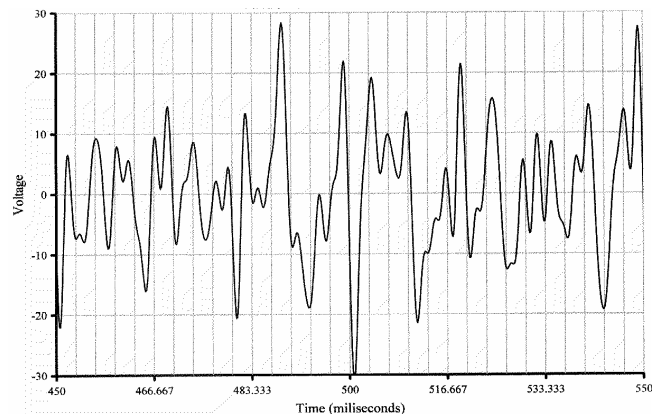


Fig. 12 – Ruído rosa, filtrado na faixa de sub graves.

O fator de crista é a relação entre o pico de um sinal e seu valor RMS. A **TABELA 2** [1] fornece dados para diversos tipos de sinais, bem como seus fatores de crista e a potência média que pode ser obtida, sem distorção, de um amplificador capaz de fornecer, sem ceifamento, uma potência senoidal de 100 Watts.

Se quisermos amplificar, sem distorção, um sinal de ruído rosa, com um fator de crista de 9 dB, só poderemos obter uma potência média de 25 Watts, a partir de um amplificador especificado como 100 Watts senoidais.

No caso da voz humana, com um fator de crista de 15 dB, só estarão disponíveis 6,5 Watts, se quisermos um sinal isento de distorção. Toda a potência restante, será utilizada apenas durante a reprodução dos picos.

Tabela 2 – Programas musicais e suas potências médias.

Tipo de programa	Fator de Crista		Potência média Obtida de um Amp. de 100W
	restrito / amplo Em dB	Em X	
Onda Quadrada	0 / 0	1 / 1	200 / 200 W
Senóide pura	3 / 3	2 / 2	100 / 100 W
Onda Triangular	5 / 5	3 / 3	67 / 67 W
Ruído rosa	9 / 9	8 / 8	25 / 25 W
Aplauso ou Música muito comprimida	9 / 10	8 / 10	25 / 20 W
Rock pesado (médio grave de guitarra)	10 / 12	10 / 16	20 / 12,5 W
Axé (graves)	10 / 14	10 / 25	20 / 8 W
Axé (médio grave)	12 / 15	16 / 32	12,5 / 6,5 W
Pop, Rock comum	12 / 15	16 / 32	12,5 / 6,5 W
Jazz,	15 / 20	32 / 100	6,5 / 2 W
Orquestra	10 / 30	10 / 1000	20 / 0,2 W
Voz humana falada	15 / 15	32 / 32	6,5 / 6,5 W

Como podemos concluir, o *headroom* de 3 dB, que recomendamos para ser aplicado ao amplificador é, na realidade, modesto e insuficiente, para uma reprodução natural de quase todos os programas. Este valor deveria ser elevado para 10 dB.

8 – DESLOCAMENTO DO CONE

A expressão do deslocamento do cone X , de um alto-falante ao ar livre, ou montado em um baffle infinito, pode ser obtida a partir da análise do circuito equivalente mostrado na Fig. 13. Para isso, basta equacionar as duas malhas, conforme o desenvolvimento que se segue.

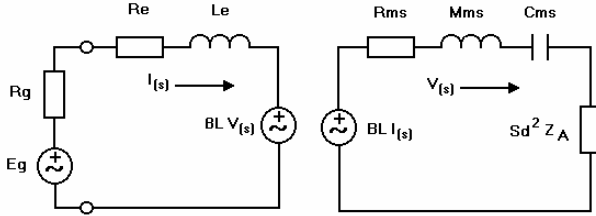


Fig. 13 – Circuito equivalente do alto-falante.

$$E_g = (R_g + R_e + s \cdot L_e) \cdot I_{(s)} + \beta L \cdot V_{(s)} \quad (1.15)$$

$$\beta L \cdot I_{(s)} = V_{(s)} \cdot \left(R_{ms} + s \cdot M_{ms} + \frac{1}{s \cdot C_{ms}} + S d^2 \cdot Z_{A(s)} \right) \quad (1.16)$$

$$Z_{E(s)} = R_g + R_e + s \cdot L_e \quad (1.17)$$

$$Z_{M(s)} = R_{ms} + s \cdot M_{ms} + \frac{1}{s \cdot C_{ms}} + S d^2 \cdot Z_{A(s)} \quad (1.18)$$

Desprezando $Z_{A(s)}$ e L_e e utilizando as relações definidas em (1.4) e (1.11), vem:

$$I_{(s)} = \frac{E_g - \beta L \cdot V_{(s)}}{Z_{E(s)}} \quad (1.19)$$

$$V_{(s)} = \frac{E_g \cdot \frac{\beta L}{Z_{E(s)}}}{\frac{(\beta L)^2}{Z_{E(s)}} + Z_{M(s)}} \quad (1.20)$$

$$V_{(s)} = E_g \cdot \frac{\beta L}{R_e \cdot \omega_s \cdot M_{ms}} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_s}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ts}} + 1} \quad (1.21)$$

$$V_{(s)} = E_g \cdot \frac{\beta L}{R_e} \sqrt{\frac{C_{ms}}{M_{ms}}} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_s}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ts}} + 1} \quad (1.22)$$

Como o espaço percorrido é igual à integral da velocidade ao longo do tempo, o que equivale a dividir a velocidade pela variável complexa $s = j\omega$, aplicando esse procedimento em (1.21) ou (1.22), vem:

$$X_{(s)} = E_g \cdot \frac{\beta L \cdot C_{ms}}{R_e} \cdot \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Q_{ts}} + 1} \quad (1.23)$$

A equação (1.23) mostra que o deslocamento do cone é diretamente proporcional à tensão aplicada e à compliância do alto-falante. Desse modo, falantes de alta compliância são mais susceptíveis a sofrerem deslocamentos excessivos.

Na **Fig. 14** podemos ver que o deslocamento do cone aumenta nas baixas frequências. Este fato exige, em sistemas profissionais, a utilização de filtros do tipo passa altas, para proteção. Em sonorização ao vivo, deslocamentos de ar podem ser responsáveis pela geração de sinais de baixas frequências capazes de destruir os falantes de graves, por excesso de deslocamento do cone.

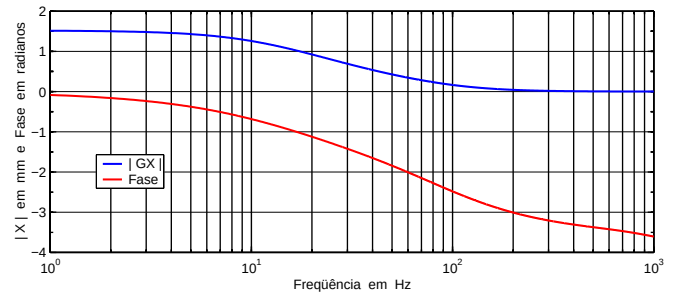


Fig. 14 – Módulo do deslocamento e fase em radianos.

Outro fato que podemos constatar é a inversão na fase do deslocamento do cone, que no caso do falante em questão ocorreu em torno de 200 Hz.

9 – PRESSÃO ACÚSTICA

A aceleração pode ser obtida através da derivada segunda do espaço, $s^2 \cdot X_{(s)}$, ou da derivada da velocidade, $s \cdot V_{(s)}$.

Aplicando este método em (1.21), obteremos (1.24):

$$A_{(s)} = Eg \cdot \frac{\beta L}{Re \cdot Mms} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qts} + 1} \quad (1.24)$$

Se multiplicarmos a velocidade do cone $V_{(s)}$ (em m/s) pela área efetiva do cone, Sd (em m^2), obteremos a velocidade volumétrica $U_{(s)}$ (em m^3/s):

$$U_{(s)} = Eg \cdot \frac{Sd \cdot \beta L}{Re \cdot \omega_s \cdot Mms} \cdot \frac{\frac{s}{\omega_s}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qts} + 1} \quad (1.25)$$

A pressão acústica produzida pelo falante, a 1 m de distância, no eixo, é dada por:

$$Pr_{(s)} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s \cdot U_{(s)} \quad (1.26)$$

$$Pr_{(s)} = Eg \cdot \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{\beta L}{Re} \cdot \frac{Sd}{Mms} \cdot \frac{\frac{s^2}{\omega_s^2}}{\frac{s^2}{\omega_s^2} + \frac{s}{\omega_s} \cdot \frac{1}{Qts} + 1} \quad (1.27)$$

Comparando a expressão da pressão acústica em (1.27) com a da aceleração do cone em (1.24), podemos constatar que diferem apenas por uma constante e podem ser relacionadas conforme abaixo:

$$Pr_{(s)} = \frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot A_{(s)} = \frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot s V_{(s)} \quad (1.28)$$

$$Pr_{(s)} = \frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot A_{(s)} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s^2 \cdot Sd \cdot X_{(s)} \quad (1.29)$$

Onde o produto $Sd \cdot X_{(s)}$, ou seja, a área efetiva do cone vezes o deslocamento, representa o volume de ar deslocado pelo cone do falante, sendo expresso em metros cúbicos.

Podemos então afirmar que a pressão acústica produzida por um falante é diretamente proporcional à aceleração imposta ao cone.

Este fato permite que façamos as seguintes considerações: Deslocamento do Cone e Pressão Acústica

Conforme vimos acima, a pressão acústica produzida pelo falante é diretamente proporcional à aceleração, sendo que a aceleração é a derivada segunda do deslocamento.

$$Pr_{(s)} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot s^2 \cdot Sd \cdot X_{(s)} \quad (1.30)$$

Substituindo s por $j\omega$, vem:

$$Pr_{(j\omega)} = - \frac{\rho}{2\pi} \cdot \omega^2 \cdot Sd \cdot X_{(j\omega)} \quad (1.31)$$

Assim, em baixas frequências, para se obter altos valores de pressão acústica é imprescindível que o volume de ar deslocado pelo cone seja elevado (para compensar a diminuição da frequência).

Como a pressão acústica depende do quadrado da frequência, para mantermos constante o nível de pressão sonora, o deslocamento do cone deverá quadruplicar toda vez que a frequência cair pela metade (uma oitava), já que Sd permanece constante.

No entanto, fica evidente que a utilização de falantes com diâmetros elevados é muito oportuno nas baixas frequências, uma vez que isso vai poupar o cone da necessidade de efetuar grandes deslocamentos.

Em compensação, em frequências mais elevadas, o deslocamento do cone será mínimo.

Resumo

A pressão acústica é diretamente proporcional:

1 – À aceleração do cone.

2 – À densidade do ar.

Assim, em um dia frio e seco, ao nível do mar (alta pressão atmosférica), teremos maior SPL.

3 – Ao volume de ar deslocado, $Sd \cdot X_{(s)}$;

4 – Ao quadrado da frequência.

Para uma mesma pressão acústica, reduzindo a frequência à metade implicará em quadruplicar o deslocamento do cone. Inversamente, subindo uma oitava, o deslocamento ficará quatro vezes menor.

10 - DIRETIVIDADE

O comportamento dos alto-falantes é extremamente dependente do cociente entre o perímetro do cone e o comprimento de onda, expresso pela quantidade ka , onde k é o numero de onda (*wave number*) e a representa o raio efetivo do cone, de modo que:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{C} = \frac{\omega}{C} \quad (1.32)$$

$$k = \frac{2\pi a}{\lambda} = \frac{\text{Perímetro}}{\text{Comprimento de Onda}} \quad (1.33)$$

$$S_d = \pi a^2 \quad (1.34)$$

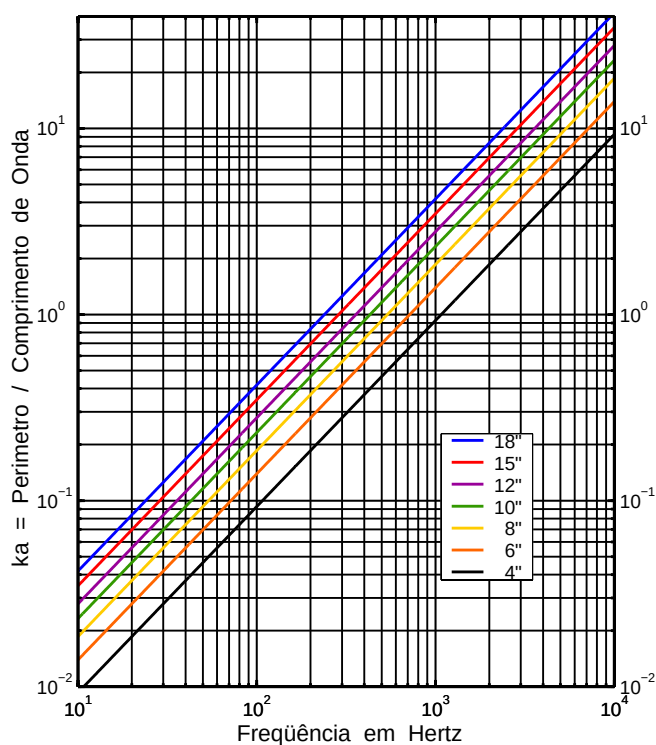


Fig. 15 – Valores de ka para diversos diâmetros.

A Fig. 15 mostra os valores de ka , para diversos diâmetros efetivos, em função da frequência.

Diretividade no Baffle Infinito

O valor de ka não apenas influi na eficiência como tem papel importante na diretividade do pistão.

Nas **Fig. 16** e **17** temos os diagramas polares correspondentes a ka igual a 1, quando o pistão é omnidirecional, ou seja, irradia em todas as direções e ka igual a 1, onde aparecem diversos lóbulos.

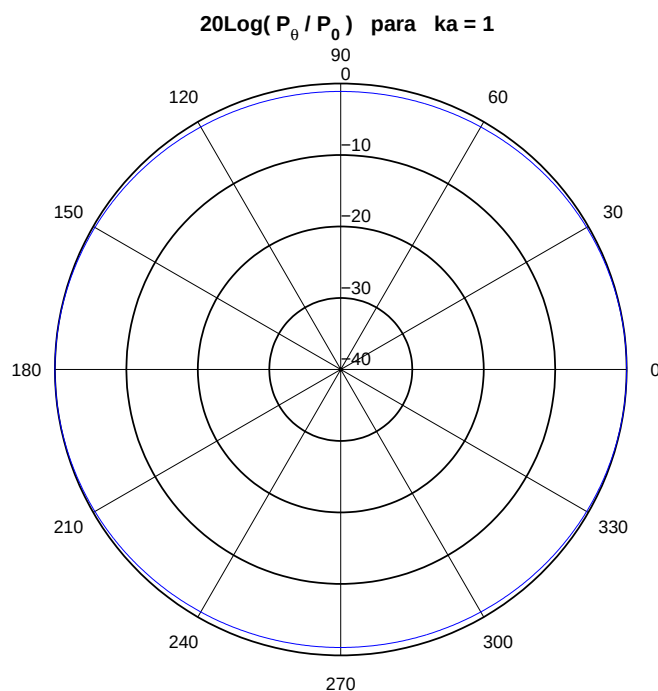


Fig. 16 – Diagrama polar para um pistão em BI e $ka = 1$.

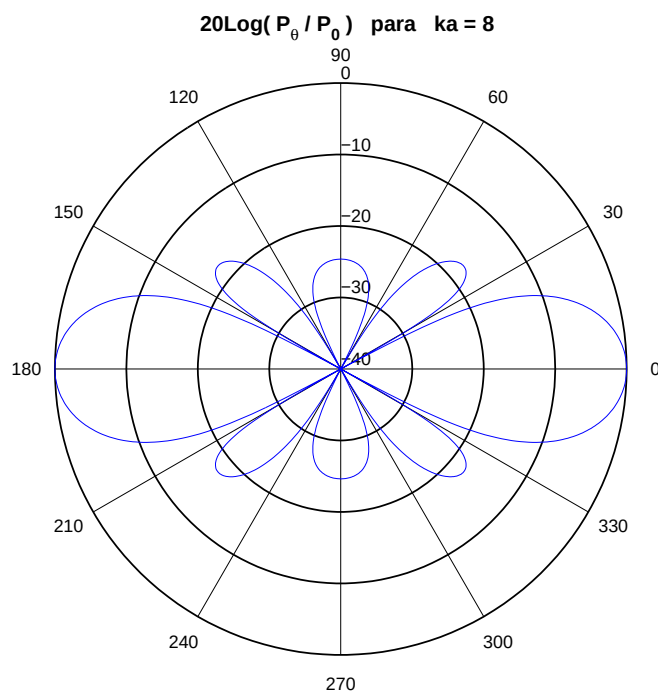


Fig. 17 – Diagrama polar para um pistão em BI e $ka = 8$.

A **Fig. 16** nos leva a concluir que em uma caixa acústica, operando em baixas frequências, teremos aproximadamente o mesmo SPL em qualquer ponto dela equidistante, seja na frente, dos lados ou até atrás.

A relação entre a pressão acústica P_θ , medida segundo um ângulo θ em relação ao eixo central do falante, e a potência P_0 , medida no eixo, é dada pela equação (1.35).

Para valores de $ka > 1$, a diretividade cresce e surgem lóbulos secundários de radiação, muito comuns nos sistemas de PA e que, cada vez mais, chamam a atenção dos técnicos que tentam entender e resolver o problema.

Embora uma radiação uniforme, cobrindo todos os ângulos seja o que se busca, a radiação traseira, tão comum nos graves, geralmente é indesejável, pois invade o palco acarretando inúmeros problemas.

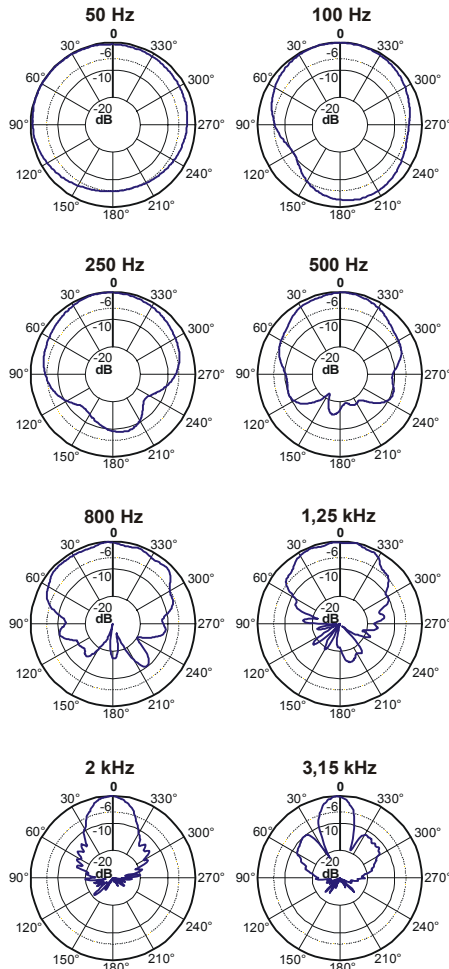


Fig. 18 – Diagramas polares do WPU1805, em caixa refletora de graves de 110 litros.

$$\frac{P_{\theta}}{P_0} = \frac{2J_1[ka \cdot \sin(\theta)]}{ka \cdot \sin(\theta)} \quad (1.35)$$

Diretividade ao Ar Livre (*Free Air*)

Um alto-falante ao ar livre, ou seja, sem a utilização de qualquer tipo de caixa acústica ou baffle comporta-se como um dipolo (duas fonte pontuais, próximas entre si) para $ka < 1$, onde a onda frontal cancela a onda traseira do cone fazendo com que, no plano que contém o pistão, não haja

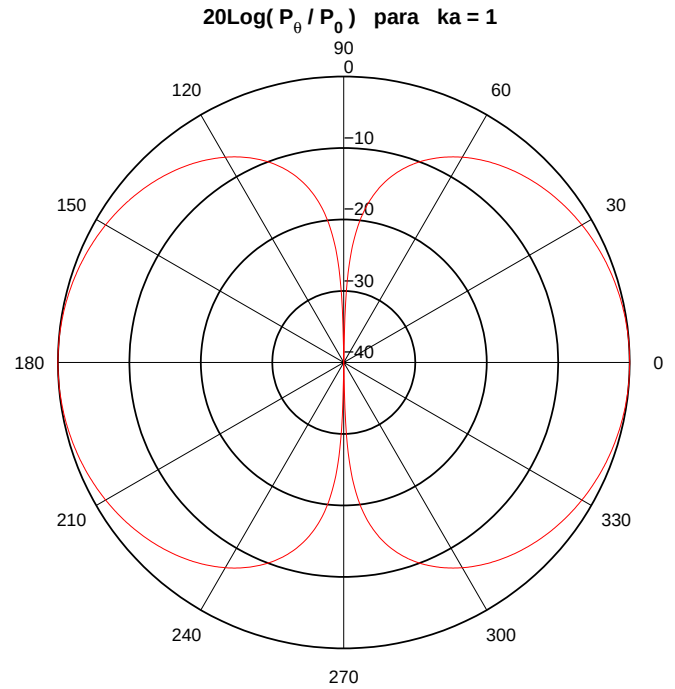


Fig. 17 – Diagrama polar para um pistão em FA e $ka = 1$.

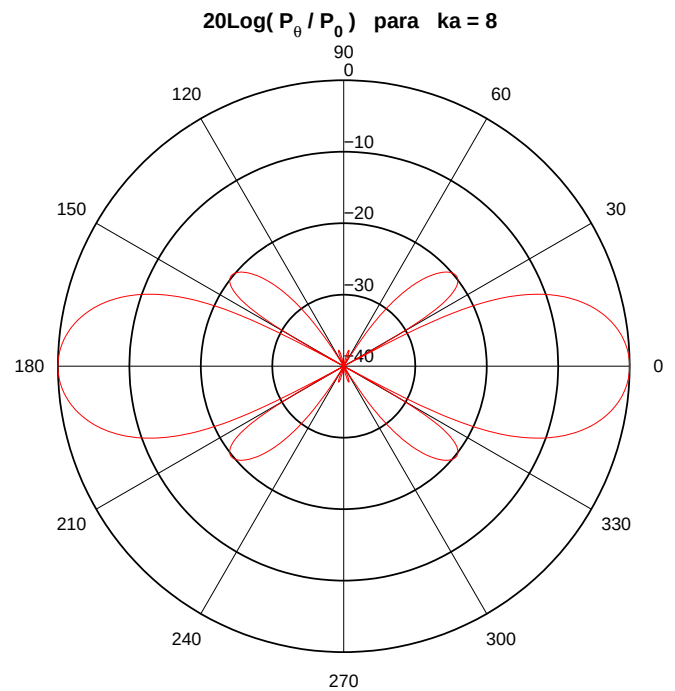


Fig. 19 – Diagrama polar para um pistão em FA e $ka = 8$.

som irradiado. Este comportamento é dado pelo termo $\cos(\theta)$ que aparece na equação da diretividade, (1.36).

Aliás, esta é posição ideal para investigar os ruídos mecânicos produzidos pelo alto-falante, que deve ser colocado com a borda ortogonalmente ao ouvido, e não com o cone para ele direcionado. Desse modo, o sinal produzido pelo falante é nulo, tornando o ruído mais perceptível.

Um falante recém reparado pode ser assim investigado, de preferência excitado na sua frequência de ressonância mecânica, onde a velocidade de deslocamento do cone é máxima e o resultado de descolamentos ou o movimento de partículas no gap será bastante perceptível.

$$\frac{P_{\theta}}{P_0} = \frac{2J_1[ka \cdot \sin(\theta)]}{ka \cdot \sin(\theta)} \cdot \cos(\theta) \quad (1.36)$$

$J_1(x)$ é a função de Bessel da primeira espécie.

Na Fig. 20 vemos algumas equações, de interesse para acústica, que utilizam esta função.

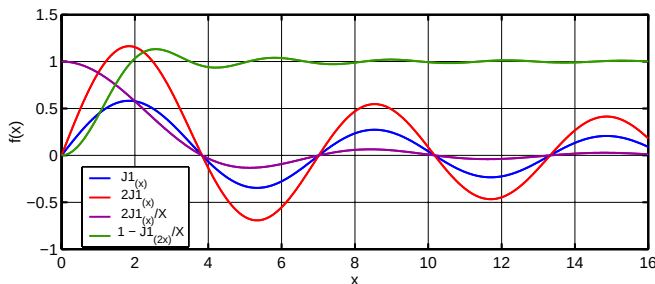


Fig. 20 – Equações utilizando a função de Bessel, citada.

11 – CAIXAS ACÚSTICAS

As caixas acústicas são quase que imprescindíveis para os falantes pelos seguintes motivos:

- 1 – Eliminar o cancelamento entre as ondas frontal e traseira geradas pelos dois lados do cone, que conferem à fonte sonora um comportamento de dipolo, o que é especialmente necessário nas baixas frequências ($ka < 2$);
- 2 – Reduzir o deslocamento do cone;
- 3 – Modificar a diretividade.

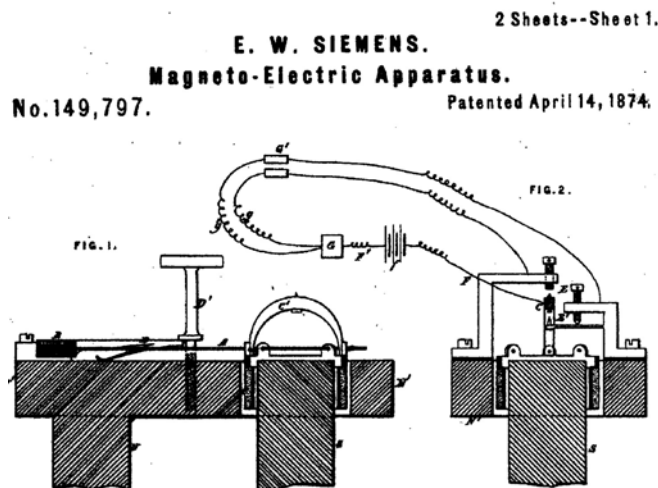


Fig. 21 – Fragmento da patente de Siemens.

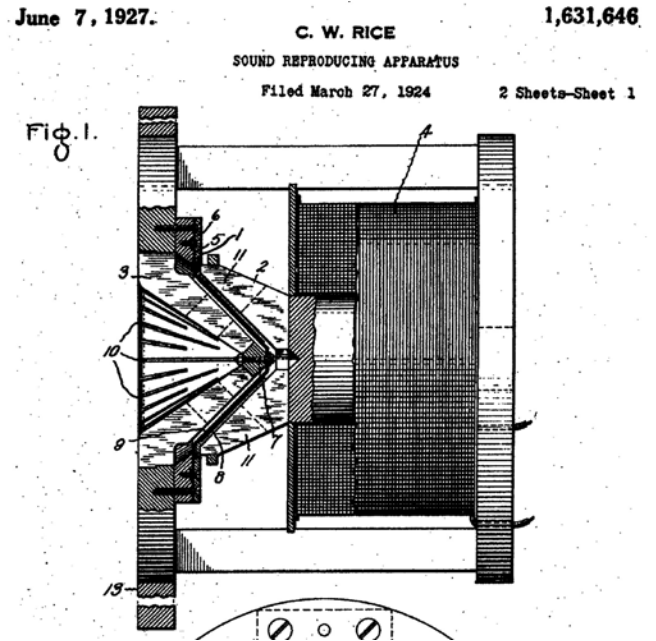


Fig. 22 – Fragmento da patente de Rice.

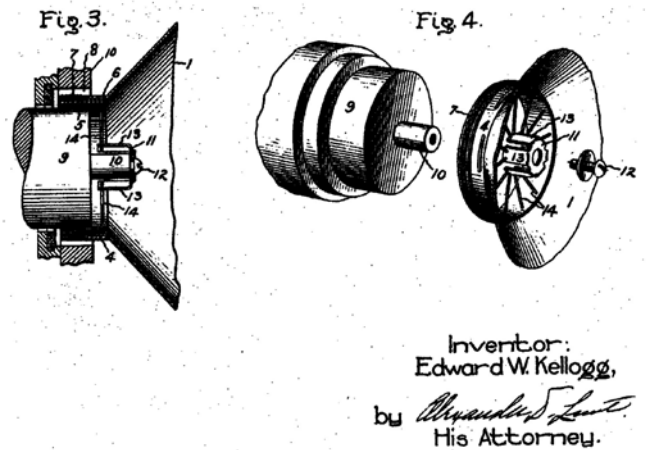


Fig. 23 – Fragmento da patente de Kellogg (1,707,617) pedida em 09/01/1925 e concedida em 02/04/1929..

Fazendo um pequeno retrospecto histórico constatamos que os nomes de Ernst Werner Siemens, fundador da famosa empresa alemã Siemens & Halske, Chester W. Rice e Edward W. Kellogg estão ligados ao surgimento do alto-falante.

A patente de Siemens, pedida em 20 de Janeiro de 1874, e concedida em 14 de Abril daquele mesmo ano, descrevia um “aparato eletro magnético” como forma de movimentar uma bobina através da corrente que a atravessava. Embora o dispositivo tivesse sido usado como um relé telegráfico, Siemens vislumbrou uma aplicação para sinais de áudio.

As patentes de Rice e de Kellogg descrevem claramente o alto-falante e praticamente do modo como o conhecemos hoje.

As caixas acústicas do tipo corneta precederam as de radiação direta em quase duas décadas e meia, e foram a base para a reprodução sonora desde o início do século 20 e, portanto, estão se encaminhando para completar um século de uso.

De lá para os dias atuais, ambos os tipos se beneficiaram das inovações técnicas que surgiram devido ao progresso da tecnologia e também devido a um nível de exigência cada vez maior.

No início do século 20 as cornetas eram o único meio viável para se conseguir níveis de pressão sonora adequados, a partir dos amplificadores que existiam na época, limitados a no máximo 10 watts sendo 2 Watts um valor considerado elevado. Desta forma, a elevada eficiência das cornetas (até 50 %, quando bem projetadas) era o único meio para se conseguir os níveis de pressão sonora desejados.

A invenção do cinema falado, em 1926, e o surgimento de salas de projeção de grandes dimensões (às vezes 7 mil lugares), impôs uma pressão cada vez maior por aperfeiçoamentos técnicos no áudio.

Paul Klipsch, em 1941, desenvolveu uma caixa tipo corneta para uso residencial (**Fig. 24**) que causou surpresa no mercado pela sua grande fidelidade, elevada pressão sonora e por ocupar pouco espaço nas salas das residências da época. Esta caixa acústica, que usava o canto da parede como parte integrante da corneta (**Fig. 25**), teve vida longa e é fabricada até hoje, pela mesma companhia, com vendas bastante expressivas, principalmente no Japão.

Com o advento do transistor e de transdutores capazes de suportar mais potência elétrica, no início dos anos sessenta houve uma diminuição na procura por caixas tipo corneta, e seu uso passou a se concentrar em grandes sonorizações, principalmente em locais abertos, que exigiam elevadas pressões sonoras.

Obrigatoriamente, toda corneta apresenta uma garganta, acoplada ao transdutor, que possui uma área menor que a da boca. É nisto que reside a elevada eficiência associada aos sistemas com corneta.

Na garganta, com sua pequena área, temos elevado nível de pressão acústica e pequena vazão. Como o cociente pressão/vazão ($\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-4}$) é uma impedância acústica, no lado do transdutor a corneta possui uma elevada impedância.

Já no lado da boca, acontece justamente o inverso: a grande área reduz a pressão e aumenta a vazão, o que caracteriza uma baixa impedância do lado do ar.

Desta forma, o descasamento de impedâncias existente entre o lado acústico do alto-falante e o ar fica resolvido através deste transformado acústico, onde a relação de espiras vale S_T/S_M , ou seja, a razão entre a área da garganta e a área da boca da corneta.

A baixa eficiência dos alto-falantes eletrodinâmicos deve-se a este descasamento de impedâncias.

As características mais importantes de uma corneta são sua eficiência e sua diretividade, que permite projetar o som onde for necessário, o que é uma característica altamente desejável, por vários motivos.

A impedância de radiação do ar, Zar, para um falante montado em um baffle infinito, e suas componentes resistiva

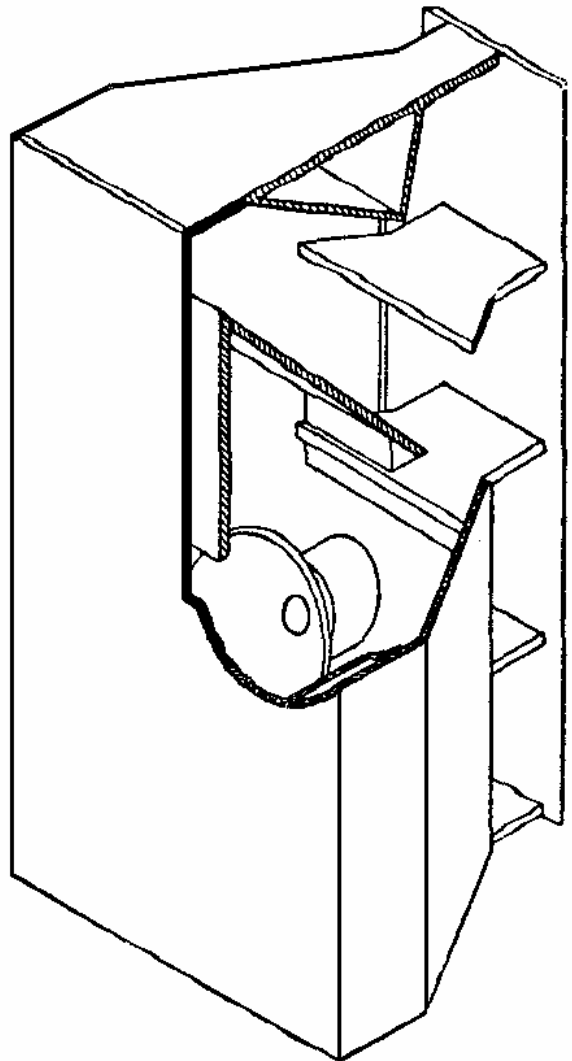


Fig. 24 – A famosa corneta de Klipsch.

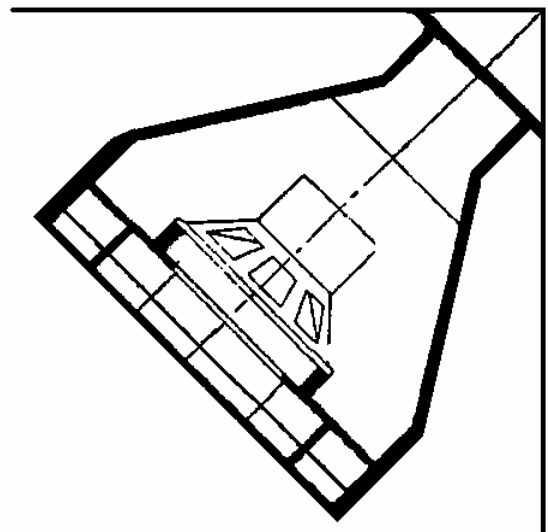


Fig. 25 – Montagem no canto da parede.

e indutiva, respectivamente $R1$ e $X1$, podem ser obtidas através das expressões que se seguem.

O produto densidade do ar vezes a velocidade do som, ou seja, ρC é a chamada impedância característica do ar.

$$Z_{ar} = \frac{\rho C}{\pi a^2} [R1_{(x)} + jX1_{(x)}] = \frac{\rho C}{\pi a^2} Z1_{(x)} \quad (1.37)$$

$$Z1_{(x)} = R1_{(x)} + jX1_{(x)} \quad (1.38)$$

$$x = 2ka \quad (1.39)$$

$J1_{(x)}$ e $H1_{(x)}$ são, respectivamente, as funções de Bessel (primeira espécie) e a de Struve.

$$R1_{(x)} = 1 - 2 \frac{J1_{(x)}}{x} \quad (1.40)$$

$$X1_{(x)} = 2 \frac{H1_{(x)}}{x} \quad (1.41)$$

Como $2J1_{(x)} / x = J1_{(x)} / (x/2)$ então $J1_{(2x)} / x$ é uma forma equivalente para a obtenção de $R1_{(x)}$ desde que, neste caso, x seja igual a ka (e não $2ka$, como adotamos aqui).

Os valores de $R1_{(x)}$ e $X1_{(x)}$ podem ser também obtidos através dos desenvolvimentos em série, abaixo:

$$R1_{(x)} = \frac{x^2}{2 \cdot 4} - \frac{x^4}{2 \cdot 4^2 \cdot 6} + \frac{x^6}{2 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8} \dots \quad (1.42)$$

$$X1_{(x)} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{x^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} \dots \right] \quad (1.43)$$

Como podemos constatar na **Fig. 26**, a impedância de radiação do ar é praticamente resistiva e igual a 1 (valor normalizado) para $ka > 1$, situação que pode acontecer em duas situações diferentes :

$ka > 1$

- Nas altas frequências, quando o perímetro do pistão torna-se maior que o comprimento de onda;
- Nas baixas frequências com um pistão de dimensões maiores que o comprimento de onda.

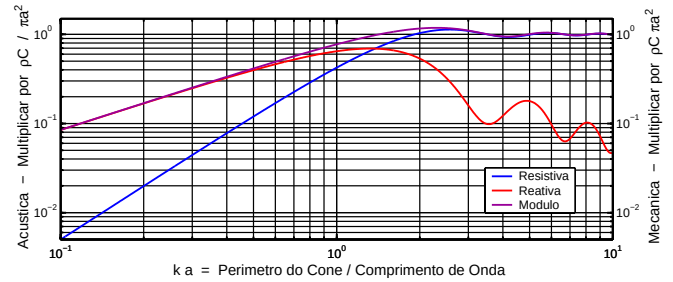


Fig. 26 – Componentes da impedância de radiação do ar.

O primeiro caso é o que geralmente ocorre com os alto-falantes individualmente.

O segundo pode acontecer em um empilhamento com grande quantidade de caixas, em um PA avantajado.

Assim, o valor da impedância de radiação do ar depende de uma relação entre a dimensão da fonte do sinal e o valor da frequência, e não de um ou outro isoladamente.

Para $ka < 1$, a impedância de radiação do ar torna-se essencialmente reativa, predominando a componente indutiva. Esta situação se verifica nas baixas frequências, onde o perímetro do pistão torna-se menor que o comprimento de onda do sinal.

A característica fortemente indutiva da impedância de radiação do ar, para $ka < 1$, explica o fraco desempenho dos alto-falantes em baixas frequências, uma vez que a potência acústica desejada, W_a , dissipada na componente resistiva, torna-se muito pequena em relação à componente reativa.

Para valores de $ka > 1$, a impedância do ar torna-se essencialmente resistiva e a conversão da potência elétrica em acústica torna-se muito mais eficiente.

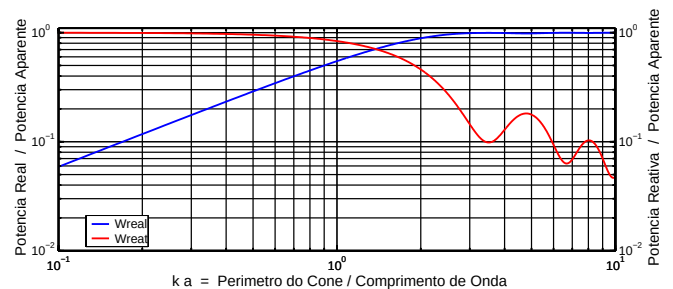


Fig. 27 – Potências real e reativa, na impedância de radiação do ar, relativas à potência aparente.

A **Fig. 27** mostra como se distribuem as potências real, reativa e aparente quando um gerador ideal de pressão acústica é acoplado diretamente à impedância de radiação do ar.

A potência real seria aquela transformada em som; a reativa, aquela na componente indutiva e a aparente, a potência total fornecida pelo gerador.

Para haver eficiência nas baixas frequências o perímetro do diafragma deverá ser maior que os comprimentos de onda de interesse, o que geralmente nunca acontece para um único transdutor, mas pode ocorrer para um agrupamento deles.

A Caixa Corneta

Para ilustrar, vamos descrever os parâmetros de uma corneta dobrada, projeto de Carlos Correia, utilizada em quase todos os Trios Elétricos do Brasil e que está disponível, gratuitamente, no site www.selenium.com.br.

A caixa que analisaremos é a HB1502B1, usando dois falantes de 15" polegadas, marca Selenium, modelo WPU1505. Para isso, utilizaremos a teoria de Thiele-Small, aplicada ao projeto de cornetas de baixas frequências por Donald Keele Jr., atualmente um dos maiores projetistas de cornetas do mundo [2].

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros utilizados na análise da caixa corneta.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS
$F_{HC} = 2Q_{ts} \cdot F_s \cdot V_{as} / V_{FC}$ = Frequência de corte superior (- 3dB) devida à cavidade frontal agindo sozinha.
$F_{HM} = 2F_s / Q_{ts}$ = Frequência de corte superior (- 3dB) devida à massa móvel agindo sozinha.
$F_{HVC} = R_E / \pi \cdot L_e$ = Frequência de corte superior (- 3dB) devida à indutância do falante agindo sozinha.
$F_{LC} = Q_{ts} \cdot F_s / 2$ = Frequência de corte inferior (- 3dB) devida à compliância do falante, em tubo infinito.
L_H = comprimento da corneta, em metros.
S_d = Área efetiva do cone do falante, em m^2 .
S_T = Área da garganta (parte menor do início da corneta, onde se monta o falante ou o driver) em m^2 .
S_d/S_T = Índice de compressão.
S_M = Área da boca (parte maior da corneta, por onde sai o som), em m^2 .
V_b = volume traseiro, em litros.
V_{FC} = Volume de ar entre o cone do falante e a garganta, em litros ou metros cúbicos.
F_s = Frequência de ressonância ao ar livre, em Hz.
L_e = Indutância da bobina móvel, em Henry.
Q_{ts} = Fator de qualidade total.
R_E = Resistência da bobina, em Ohms.
V_{as} = Volume equivalente do falante em litros ou m^3 .

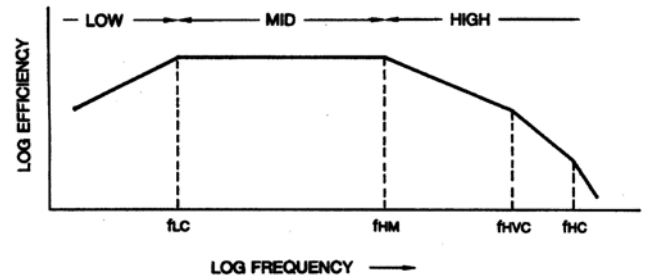


Fig. 28 – Frequências de corte na corneta.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros utilizados na análise da caixa corneta.

VALORES DOS PARÂMETROS
$F_{HC} = 2 \cdot 0,39 \cdot 36 \cdot 163 / 2 = 2.288,5 \text{ Hz}$
$F_{HM} = 2 \cdot 36 / 0,39 = 184,6 \text{ Hz}$
$F_{HVC} = 6,7 / 3,1416 \cdot 1,321 = 1.614,4 \text{ Hz}$
$F_{LC} = 0,39 \cdot 36 / 2 = 7,0 \text{ Hz}$
$L_e = 1,321 \text{ mH}$ ou $0,001321 \text{ H @ } 1 \text{ kHz}$
$L_H = 144,2 \text{ cm}$ ou $1,442 \text{ m}$
$S_d = 814 \text{ cm}^2$ ou 0.0814 m^2 , cada alto-falante.
$S_T = 385.6 \text{ cm}^2$ ou 0.03856 m^2
$S_d/S_T = 2,11$
$S_M = 6.000 \text{ cm}^2$ ou $0,6 \text{ m}^2$
$V_b = 57,3 \text{ litros}$ ou $0,0573 \text{ m}^3$, para cada falante.
$V_{FC} = 2 \text{ litros}$ ou $0,002 \text{ m}^3$
$F_s = 36 \text{ Hz}$
$Q_{ts} = 0,39$
$R_E = 6,7 \text{ ohms}$
$V_{as} = 163 \text{ litros}$.

Segundo Keele [2] a região de resposta plana de uma corneta é delimitada nas baixas frequências por F_{LC} , e nas altas frequências por F_{HM} . As outras frequências de interesse, que estão representadas na **Fig. 28**, são dadas pelas equações que constam na **TABELA 3**. Os parâmetros utilizados na análise podem ser visualizados na **Fig. 31**.

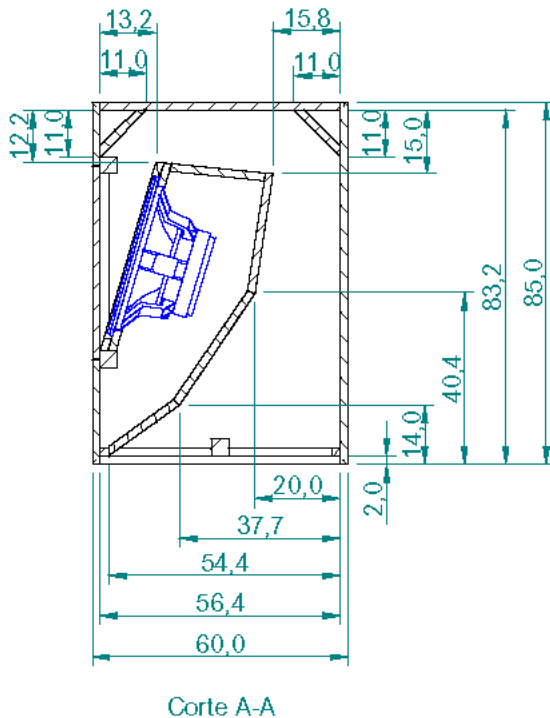


Fig. 29 – Vista em corte da corneta dobrada HB1502B1.

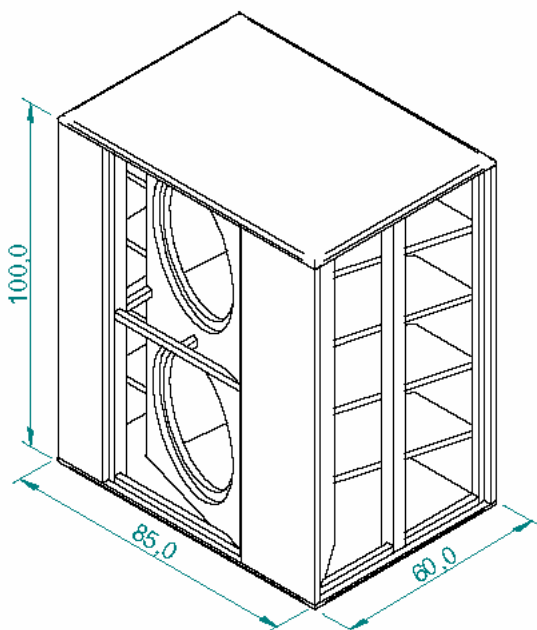


Fig. 30 – Vista da corneta dobrada HB1502B1.

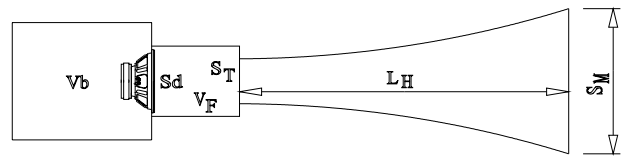


Fig. 31 – Visualização dos parâmetros utilizados.

O falante utilizado permitiria que uma frequência de corte inferior, da ordem de 7 Hz, fosse conseguida. Mas, isto implicaria em uma boca com dimensões avantajadas e, por razões práticas, optamos por utilizar uma frequência de corte igual a 40 Hz. Daí para baixo, há uma atenuação de 6 dB por oitava.

Em F_{HM} inicia-se uma atenuação de 6 dB por oitava, no lado das altas frequências, devido à massa móvel do falante. Como esta caixa destina-se à reprodução de baixas frequências, isto não constitui problema, uma vez que será utilizada muito abaixo desta frequência, geralmente cortada eletronicamente em 160 Hz, ou menos.

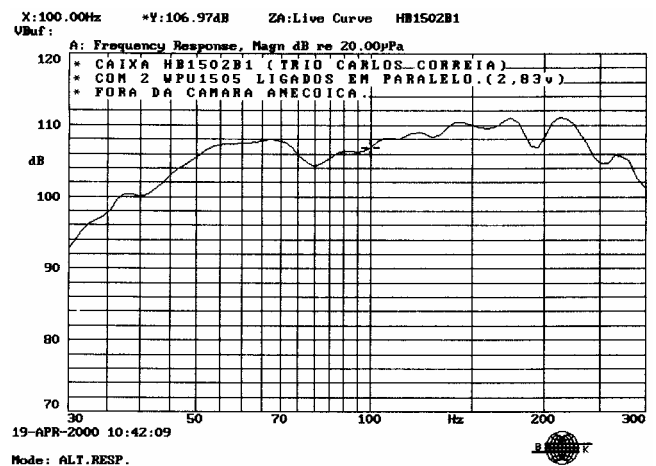


Fig. 32 – Resposta da corneta dobrada HB1502B1.

Preconceito contra as cornetas.

Em trabalho anterior, Carlos Correia [5] mostrou o equivoco de algumas opiniões, aliás destituídas de qualquer fundamento técnico, emitidas por leigos ou pessoas mal informadas, que se limitavam a repetir os argumentos ouvidos de outros, sem a preocupação de verificar se estas afirmações eram ou não verdadeiras.

Vejamos um pouco deste folclore:

1 – “Caixas do tipo corneta apresentam mais distorção que as do tipo radiação direta”.

Em primeiro lugar, alguns comparam os valores da distorção de alto-falantes com aqueles dos amplificadores, sendo de que, para estes últimos, os números são muito menores, mesmo quando trabalhando perto de sua potência máxima.

Nas baixas frequências, distorções de segundo harmônico, da ordem de 40 a 60 % , podem facilmente ocorrer. Muitas vezes isso se deve ao fato de que, naquela região, a caixa não está respondendo adequadamente à fundamental, o que realça a presença dos harmônicos.

Como as distorções de segundo harmônico tendem a não soar de forma desagradável, pois estando uma oitava acima causam um efeito “musical”, sendo bem aceitas pelo ouvido mas registradas pelos instrumentos de medição.

Especificamente nas cornetas só encontramos elevadas distorções (supondo que estas não foram geradas pelo alto-falante, quando também ocorreriam em caixas de outro tipo) quando são utilizadas elevadas taxas de compressão na garganta, com o objetivo de se conseguir máxima eficiência ou simplesmente por deficiência do projeto. Neste caso, o ar, submetido às altas pressões, geradas por falantes excitados à plena potência, e montados em uma garganta muito pequena, torna-se extremamente não linear. O resultado disso é pejorativamente conhecido com “som de corneta”, que é imitado por alguns, falando com o nariz tampado.

Uma prova eloqüente, de que uma corneta, quando adequadamente projetada, não sofre deste problema, é a velha W Horn, muito conhecida dos PAzeiros, desenvolvida por D. B. Keele Jr, e capaz de produzir 124 dB, com um único falante de 18”, gerando 3% de distorção harmônica total, e apresentando uma banda passante de 60 a 400 Hz, sem nenhum tipo de assistência eletrônica, pratica essa muito comum hoje em dia.

2 – “As cornetas são muito grandes e pesadas se dimensionadas para reproduzir baixas frequências.”

Examinando, hoje, o mercado mundial, vemos caixas acústicas de radiação frontal com volumes entre 500 e 700 litros, sem serem sistematicamente acusadas de possuírem peso e volume exagerados.

Com essa cubagem, é possível projetar cornetas adequadas, com a mesma frequência de corte, e sem a obrigatoriedade da assistência eletrônica que, se usada, produzirá resultados ainda melhores.

3 – “O acoplamento mutuo só acontece com as caixas de radiação direta.”

O acoplamento mutuo beneficia tanto as caixas do tipo corneta com as de radiação direta. Este fenômeno, primeiramente documentado por Maximillian Weil em 1925 [6] e, por ironia, usando justamente cornetas como exemplo, já que até 1925 não existiam alto-falantes eletrodinâmicos como os conhecemos hoje.

Alguns anos mais tarde, E. W. Kellogg, um dos inventores dos alto-falantes eletrodinâmicos modernos, publicou um artigo [7] onde cita em detalhes este efeito.

O acoplamento mutuo acontece quando caixas acústicas são posicionadas próximas umas das outras e as distancias entre o centros dos alto-falantes é menor ou igual que um quarto do comprimento de onda da frequência mais alta onde queremos que o acoplamento aconteça.

Quando isso ocorre, para duas caixas, teremos um aumento na extensão da resposta de baixas frequências e um ganho de 6 dB no nível da pressão acústica, onde metade deveu-se à

duplicação da potência aplicada e o restante à duplicação da eficiência do falante.

Este resultado fica ainda mais pronunciado quando montamos as caixas, lado a lado, e no chão, pois assim fazendo, temos um ganho adicional de mais 6 dB, devido ao piso, que atua como uma “superfície refletora”, e tudo se passa como se houvesse o dobro do numero de componentes.

Alem disso, o lugar mais comum para se montar caixas destinadas à reprodução de baixas frequências é o chão.

Para melhorar o acoplamento, a eficiência e o controle de diretividade, as cornetas, sempre que possível, devem ser montadas no chão, aos pares, lado a lado. As demais, se existirem, deverão ser empilhadas umas sobre as outras formando uma coluna vertical.

4 – “As caixas frontais são mais eficientes nos graves do que as cornetas.”

É comum, hoje, vermos caixas de radiação direta, com volumes externos ao redor de 500 litros, usando dois falantes de 18” polegadas, exibindo frequências de corte ao redor de 40 Hz (com assistência eletrônica) e eficiências ao redor de 96 a 98 dB. Com estes volumes é possível projetar cornetas com a mesma frequência de corte inferior das anteriores, mas com uma eficiência ao redor de 104 a 106 dB.

Assim, em muitos casos, é possível conseguir cornetas mais eficientes que as caixas de radiação direta.

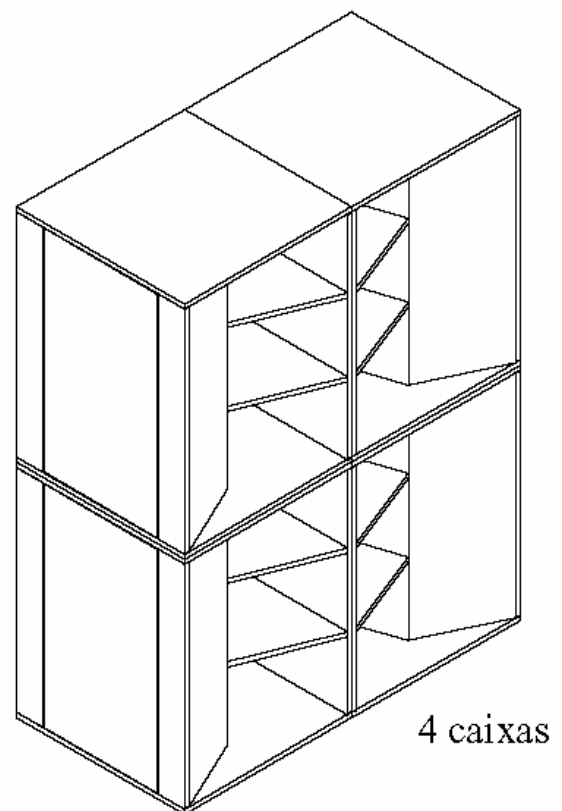


Fig. 33 – Sugestão para empilhamento da HB1502B1, 4 caixas (ou mais).

5 - “O projeto de caixas tipo corneta, ao contrario das caixas de radiação direta, não segue nenhum método científico nem se utiliza dos consagrados parâmetros T-S.”

Basta entrar no site da Áudio Engineering Society (www.aes.org), para ver que é possível encontrar vasta bibliografia sobre o projeto de cornetas, utilizando métodos científicos atuais.

No site da Eletrônica Selenium (www.selenium.com.br), pode-se fazer o download, gratuitamente, de um programa de autoria do Prof. Homero Sette que auxilia no projeto de caixas tipo corneta.

Neste trabalho, também contemplamos este aspecto.

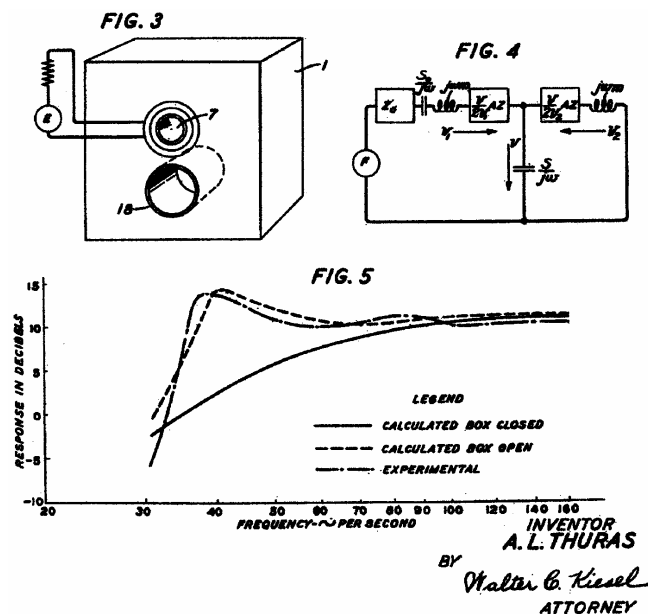


Fig. 34 – Fragmento da patente do refletor de graves.

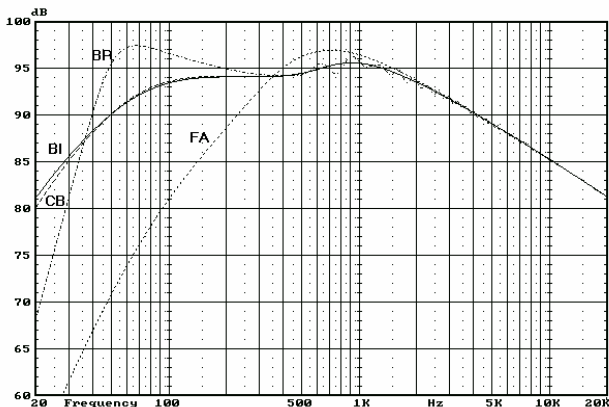


Fig. 35 – Simulação feita pelo LEAP [4] do WPU1505 em: BR – Refletor de Graves (*Bass Reflex*) ; BI – Baffle infinito ; CB - Caixa Fechada (*Closed Box*) ; FA – Ar Livre (*Free Air*).

A caixa Refletora de Graves

As caixas de radiação direta deram um salto quando A. L. Thuras descobriu o princípio do refletor de graves (*bass reflex*).

Na patente 1,869,178, pedida em 15/08/1930 e concedida em 26/06/1932 (ver Fig. 34), ele menciona o ganho nas baixas frequências, que foi conseguido em relação à caixa fechada (*closed Box*).

Isto é possível graças ao aproveitamento da energia gerada pelo lado de trás do cone, que é “refletida” para o meio ambiente, através do duto, daí o nome deste sistema.

Na Fig. 35 temos uma comparação feita pelo programa LEAP [4] entre o desempenho das caixas tipo refletor de graves com a caixa fechada, o baffle infinito e a montagem ao ar livre, onde podemos observar a superioridade da primeira, sobre as demais, no que se refere à resposta em baixas frequências e à eficiência nesta região.

Na Fig. 36 vemos as componentes das velocidades volumétricas, U , em uma caixa do tipo refletor de graves (*bass reflex*), o que nos permite escrever:

$$U_D = U_B + U_P + U_L \quad (1.44)$$

A Fig. 37, mostra as componentes no exterior da caixa, o que nos leva a equacionar a componente resultante U_O , em (1.45). Combinando as equações (1.44) e (1.45), vem:

$$U_O = -U_D + U_P + U_L \quad (1.45)$$

$$U_O = -U_B \quad (1.46)$$

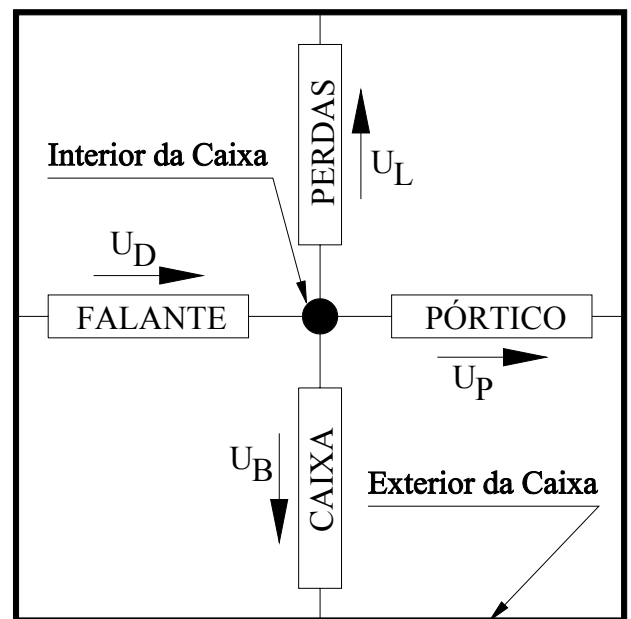


Fig. 36 – Componentes em um refletor de graves

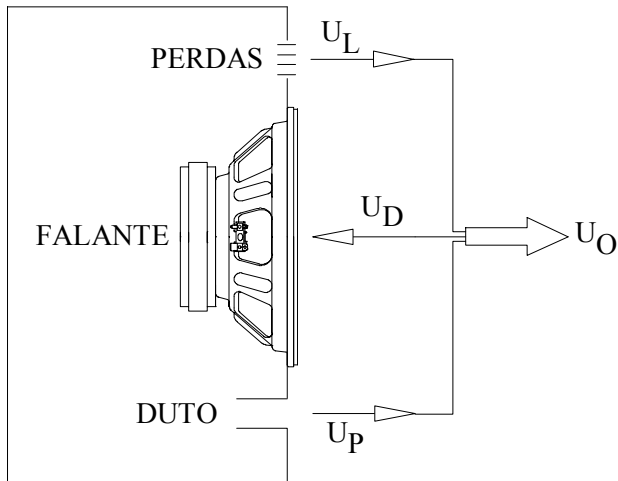


Fig. 37 – Componentes no exterior da caixa refletora.

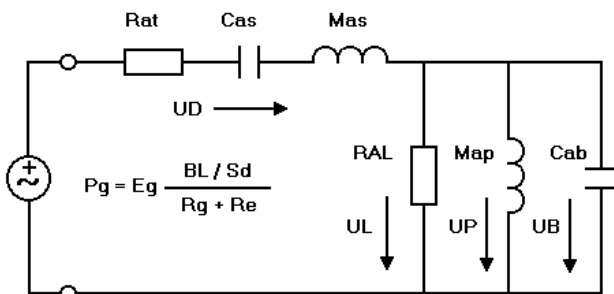


Fig. 38 – Circuito equivalente do refletor de graves.

Tabela 5 – Descrição dos parâmetros utilizados na análise da caixa refletora de graves.

DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS

U_D = Velocidade volumétrica no falante, em m^3/s .
 U_B = Velocidade volumétrica na caixa, em m^3/s .
 U_P = Velocidade volumétrica no duto (pórtico), em m^3/s .
 U_L = Velocidade volumétrica nas perdas por vazamento (*leakage*), em m^3/s .
 U_O = Velocidade volumétrica resultante, em m^3/s .

P_g = Gerador de pressão, em Pascal.
 E_g = Gerador de Tensão, em Volts.

R_{at} = Resistência acústica total em $Kg/s/m^4$.
 C_{as} = Compliância acústica total, em m^5/N .
 M_{as} = Massa acústica, em Kg/m^4 .
 C_{ab} = compliância acústica da caixa, em m^5/N .
 R_{AL} = Resistência acústica de perdas em $Kg/s/m^4$.
 M_{ap} = Massa acústica no duto em Kg/m^4 .
 Q_L = Fator de qualidade (perdas por vazamento)

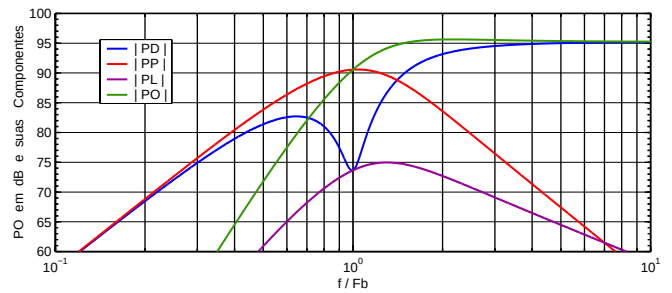


Fig. 39 – Componentes da pressão acústica em caixa BR.

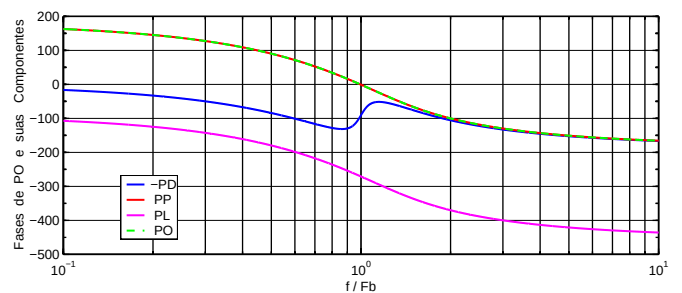


Fig. 40 – Fases das componentes em caixa BR.

Na Fig. 39 vemos as componentes da pressão acústica em uma caixa refletora de graves. Conforme podemos ver, na frequência de sintonia F_b , a contribuição do cone é mínima sendo a do duto máxima.

A componente PL representa as perdas por vazamentos (*leakage*) no duto (pórtico), sendo representada por $Q_L = 7$.

Quanto às fases dessas componentes, a Fig. 40 mostra que a resultante PO e a do duto PP, estão em fase, e ambas defasadas de 180° em relação à componente das perdas por vazamentos, PL.

Já as componentes do falante (*driver*) e do duto, abaixo de F_b , estão defasadas de 180° , ficando em fase para frequências superiores a F_b . Aí reside o princípio da caixa refletora de graves: a componente do duto reforça a do falante acima de F_b . Como PP diminui rapidamente com o crescimento da frequência, este reforço pode ser considerado efetivo até uma oitava acima de F_b . Abaixo de F_b , a oposição de fases faz com que a resposta da caixa refletora de graves caia rapidamente com a frequência.

Nas Figs 41. e 42, respectivamente, vemos uma caixa refletora de graves muito em voga, hoje, e sua curva de resposta, obtida em câmara anecoica.

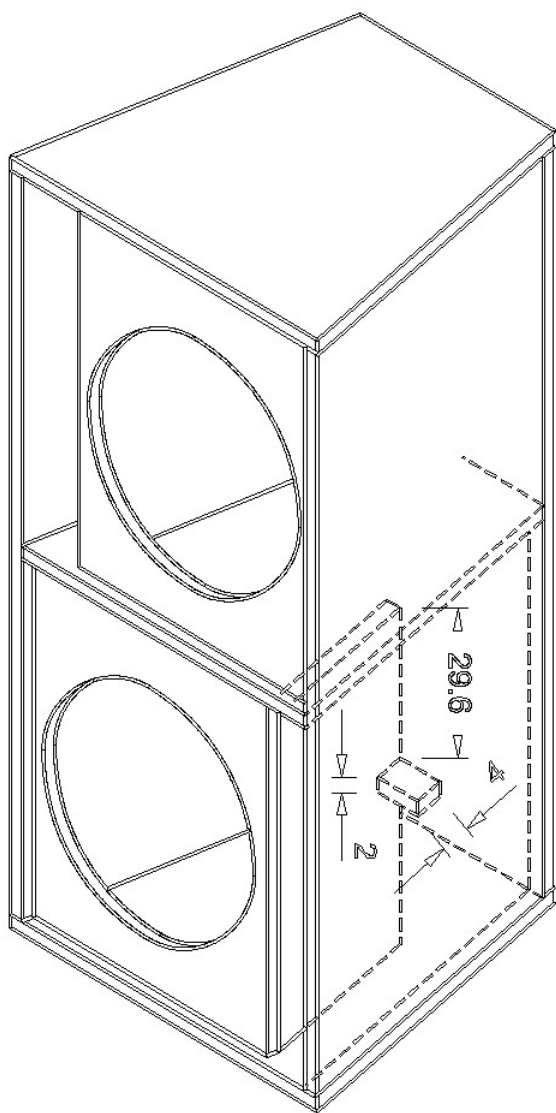


Fig. 41 – Caixa refletora de graves tipo SB850.

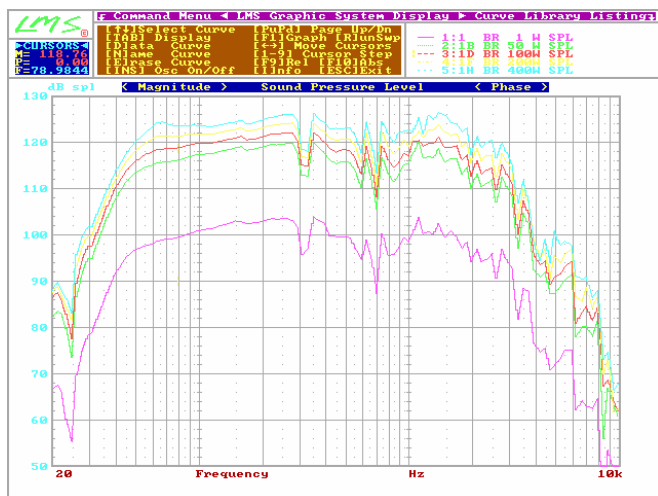


Fig. 42 – Respostas obtidas na caixa da Fig. 41, para potências de 1, 50, 100, 200 e 400 Watts.

Comentários

Em minhas viagens pelo Brasil afora (Carlos Correia), tenho me defrontado com alguns “causos” muito curiosos: Alguns sonorizadores estão sendo forçados a trocar as caixas de baixas frequências, de modelos conhecidos como “L 60” e “W Horn”, em bom estado de conservação e de funcionamento, operando em sistemas bem montados, por caixas do tipo “SB 850” ou “SB 1000”, (clonadas), por motivo de imposição comercial, disfarçada de exigência técnica, com a alegação que as duas primeiras são modelos tecnicamente decadentes e ultrapassados.

Diante do fantasma da alegada obsolescência, o empresário fica com receio de perder clientes, cede ao argumento da “modernidade”, e aí começam seus problemas reais. Ele era feliz, e não sabia!

Comprando caixas copiadas, mal sintonizadas, com baixo rendimento e inadequadas para os falantes que nela são instalados, depois de gastar um bom dinheiro é que constata o tamanho da bobagem que foi levado a fazer.

Na TABELA 6, resumindo os dados obtidos em [8], podemos ver as caixas tipo corneta ofereceram uma eficiência muito maior que as refletoras de graves (até 10 dB de diferença), sem serem significativamente maiores ou mais pesadas.

Tabela 6 – Caixas refletoras de graves e cornetas, avaliadas entre 50 e 100 Hz.

Refletores de Graves x Cornetas					
Modelo	Falantes	Área (cm ²)	Vol. (L)	SPL (dB)	Peso (Kg)
SB 850	2 x 18”	7.149	534	98,6	78
SB 1000	2 x 18”	4.072	442	95,9	85
L 60	2 x 15”	7.600	578	106	100
W Horn	1 x 18”	7.442	566	104	90

Na hora do show, esta diferença de 10 dB é esmagadora e só pode ser compensada pela aquisição, transporte e montagem de um numero muito maior de caixas, para compensar a baixa eficiência.

As áreas tabeladas são as da frente das caixas e o volume é externo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrônica Selenium S. A., pelo apoio prestado para a execução deste trabalho, a quem os autores eximem de quaisquer responsabilidades pelas informações constantes no presente trabalho.

Os autores agradecem a Santiago G. Papadópolis, Consultor Técnico da Eletrônica Selenium S.A., pela execução de diversos desenhos constantes neste trabalho.

Os autores agradecem ao Eng. Rosalfonso Bortoni, MsC, pela revisão do texto e sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ruy L. B. Monteiro, "Interface Amplificador Falante Em Regime De Alta Potência", apresentado na AES-Brasil em 07/2000.
- [2] Donald Keele Jr, "Low Frequency Horn Design Using Thiele-Small Driver Parameters", AES, Preprint 1250 de 1977 .
- [3] F. Langford-Smith, "Radiotron Designer's Handbook", 4ª edição, Wireless Press, 1953.
- [4] LEAP – Loudspeaker Enclosure Analysis Program, software para análise de caixas acústicas, de autoria de Cris Strahm e distribuído pela LinearX, U.S.A.
- [5] Carlos Correia da Silva, "Introdução À Análise Comparativa de Componentes para Reprodução Sonora de Alta Potência, para Uso Profissional. Cornetas e Radiadores Frontais: Dúvidas e Mal Entendidos", Congresso da AES-Brasil, 6 a 8 de junho de 2000.
- [6] Maximillian Weil, patente americana número 1.820.996
- [7] E. E. Kellogg, " Means for Radiating Large Amounts of Low Frequency Sound " JASA, vol. 3 , páginas 94 a 110, 1931.
- [8] Anselm Goertz, "Sub Woofer EAW KF-940, Production Partner, 10/99, páginas 98 a 104, Augsburg .
- [9] Homero Sette Silva, "Análise e Síntese de Alto-Falantes e Caixas Acústicas pelo Método de Thiele-Small", H. Sheldon Serviços de Marketing, 1996, esgotado.
- [10] Homero Sette Silva, "Modelo Não Linear do Alto-Falante para Pequenos Sinais", versão revista e grandemente ampliada do trabalho apresentado na AES-Brasil em 2001 sob o título "Modelo do Alto-Falante Considerando a Impedância de Radiação do Ar".