

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/296443694>

ENTENDENDO OS PARÂMETROS DOS ALTO – FALANTES A PARTIR DA FICHA TÉCNICA

Article · February 2015

CITATIONS

2

READS

15,790

1 author:



[Homero Sette](#)

161 PUBLICATIONS 20 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



only translator [View project](#)



DC Power Supply from 0 to 30 V (5 A) along with my students at IAV. [View project](#)

Entendendo os PARÂMETROS DOS ALTO - FALANTES A Partir da Ficha Técnica

ORIGINAL: 14-02-2015

Homero Sette Silva

REVISADO: 15-03-2015

Os parâmetros dos alto-falantes podem ser entendidos a partir da ficha técnica dos produtos, divulgada pelos fabricantes, também conhecida como data sheet. Isso, para produtos de qualidade, e quando o folheto está correto. Caso contrário, o melhor seria chamar “data shit”...

A ficha técnica do produto geralmente divide-se nas seguintes partes:

1 – Introdução

Nesta seção o fabricante faz uma breve apresentação das principais propriedades e finalidades do produto.

- **Woofers de 15”**, profissional, desenvolvido para atender as mais diversas necessidades de sonorização de médios e pequenos ambientes, apresentando excelente desempenho na reprodução de médias e baixas frequências.
- Indicado para **reforço de som** em boates, clubes, salões, auditórios, conjuntos musicais e também para **caixas monitoras**.
- Sua grande **eficiência** na reprodução sonora deve-se à excelente combinação de seus componentes.
- **Cone leve** fabricado com fibras longas e a suspensão em tecido impregnado proporcionam ao conjunto móvel grande estabilidade, alto **rendimento** e baixa distorção.
- Bobina móvel fabricada com fio resistente a altas temperaturas e enrolada em forma de **Kapton®**.
- **Carcaça em chapa de aço** reforçada, com pintura epóxi anti corrosão, apresentando elevada resistência mecânica.
- **Calota** em alumínio garante uma perfeita dissipação do calor proveniente da bobina móvel.
- Adesivos de alta resistência garantem ótima colagem e durabilidade dos componentes.
- Produto também disponível sem **logotipo**.
- *A exposição à níveis de ruído além dos limites de tolerância especificados pela Norma Brasileira NR 15 - Anexo 1*, pode causar perdas ou danos auditivos. O fabricante não se responsabiliza pelo uso indevido de seus produtos. (*Portaria 3214 / 78).*

Comentários à Introdução

• Woofers de 15” ...

Embora o sistema métrico tenha sido adotado em quase todo o mundo costumamos especificar os falantes por seus diâmetros em polegadas, por tradição. Dificilmente você ouvirá um profissional comentar a respeito de um falante de 380 mm, pois dirá sempre quinze polegadas.

Costumamos fazer o mesmo com os dutos de caixas acústicas, quando tubulares.

Pol	1/4	3/8	1/2	3/4	1	1.1/4	1.1/2	2	2.1/2	3
mm	6,35	9,52	12,7	19,05	25,4	31,75	38,1	50,8	63,5	76,2
Pol	4	5	6	7	8	10	12	15	18	21
mm	101,6	127	152,4	177,8	203,2	254	304,8	381	457,2	533,4

Woofers: falante construído para responder às frequências baixas do espectro de áudio.

Sub woofer: falante capaz de responder a frequências ainda mais baixas e suportar maior potência e maior deslocamento do cone (X_{MAX}), pois para uma mesma potência aplicada, ao descermos uma oitava (metade da frequência), o deslocamento do cone quadruplica.

Quando o **deslocamento do cone ultrapassa o valor máximo especificado pelo fabricante o falante sofre falha catastrófica**, pois a bobina colide com a arruela inferior (destroçando a bobina) e/ou a aranha, ou o anel da suspensão, rasgam.

A frequência de utilização máxima dos falantes,

C = Vel. Propagação som no ar = 340 m/s		
$2 \cdot \pi \cdot Rd = \lambda = C / Fp$		$Fp = C / (2 \cdot \pi \cdot Rd)$
Diâmetro Nominal (polegadas)	Raio Efetivo Rd (cm)	Comportamento de Pistão até Fp (Hz)
21	21	250
18	18	300
15	15	360
12	12	450
10	10	550
8	8	675
5	5	1000
Diâmetro Nominal, Raio Efetivo e Frequência Máxima Utilizável, Fp, para comportamento como pistão.		

(determinada pelo crossover), deve respeitar os valores máximos (F_p), dados na tabela anterior, sob pena da resposta transitória (timbre) ficar muito prejudicada.

Quanto maior a frequência, menor deverá ser o diâmetro do cone, e menor a sua massa. Por isso drivers e tweeters possuem diafragmas muito menores que os dos falantes (1" a 2", tipicamente).

• Reforço de som ...

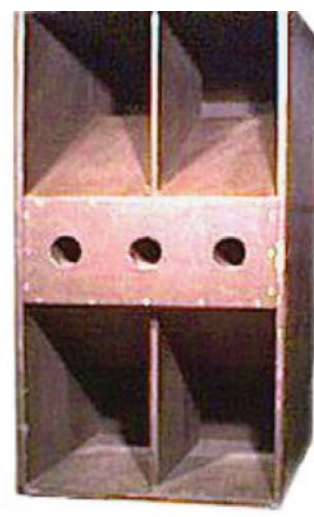
Necessário quando faz-se conveniente amplificar a informação, para sua inteligibilidade. Para isso usam-se os sistemas de som adequados ao ambiente. Os sistemas de *Public Address* são os indicados para grandes ambientes, internos ou externos.

• Eficiência ...

Infelizmente os falantes possuem baixíssima eficiência, tipicamente 2 a 3%, apenas, e isso para os mais eficientes, e menos ainda para os comuns. Isso se deve ao descasamento entre a impedância acústica de saída do falante (*não confundir com a elétrica*) e a impedância de radiação do ar, que é muito pequena. Assim, um falante com 1 % de rendimento (eficiência) ao ser alimentado com 100 Watts, fornecidos à sua bobina pelo amplificador, produzirá apenas 1 Watt de energia sonora... enquanto 99 Watts viram calor !



Sistemas multivias, totalmente cornetados.



W Horn.

As cornetas, usadas tanto em baixas frequências (W Horn, L 60, etc), quanto nas altas, em drivers e tweeters, proporcionam um perfeito casamento entre a impedância acústica do transdutor (falante, driver ou tweeter) e o ar, o que pode elevar a eficiência a teóricos 50 %, sendo 30 % um valor possível, na prática.

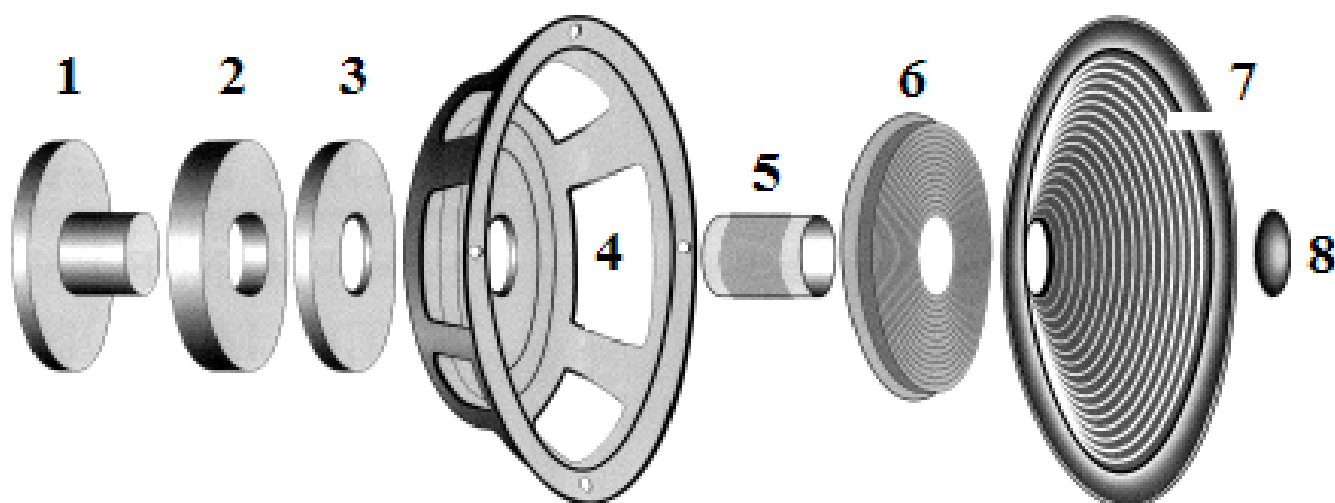
Há que diga que isso é coisa de baiano, em virtude das famosas cornetas projetadas pelo Carlos Correia, para Trios Elétricos, que alcançaram enorme fama entre os sonorizadores, e que são utilizadas também em PAs, com muito sucesso! Na verdade as cornetas são imbatíveis em eficiência ...

• Cone leve , rendimento ...

A eficiência do falante é inversamente proporcional à massa do cone. Por esse motivo o cone deve ser leve, mas sem perder sua rigidez estrutural, o que causa distorções e até danos mecânicos. A celulose de fibras longas (usada em coador de café de papel) é o material mais comum, para aliar leveza à rigidez, e ao timbre, embora existam outros, mais caros, e com melhores características, como o polímero *Kevlar*, utilizados em produtos *premium*.

• Carcaça ...

Geralmente em ferro estampado (menor custo) ou alumínio fundido (maior rigidez estrutural sem afetar a distribuição do campo magnético, pois não contém ferro) serve de suporte para a montagem do falante.



Da esquerda para a direita: 1 – arruela inferior com pino central (peça polar) ; 2 – ímã ; 3 – arruela superior ; 4 – carcaça ; 5 – bobina enrolada na forma ; 6 – aranha ; 7 – cone e anel da suspensão ; 8 – calota.

• Calota ... logotipo

Tem a finalidade principal de impedir a entrada de poeira no gap (o espaço de ar por onde se desloca a bobina). Geralmente em papel (menos harmônicos de alta frequência) ou alumínio (maior dissipação de calor).

O logo do produto, que costuma ser estampado na calota, pode ser suprimido por solicitação do cliente ou até nem existir, como nos produtos produzidos por fabricantes voltado para o mercado *OEM* (*Original Equipment Manufacturer*).



Calota.

• Níveis de ruído ...

A saúde auditiva deve ser preservada e sistemas de som profissionais são capazes de produzir níveis de pressão acústica perigosos, que podem danificar o sistema auditivo até de forma permanente.

Fique atento aos níveis seguros de exposição em função do tempo.

Exposição em Horas e Nível de SPL Tolerado									
Horas	8	6	4	3	2	1,5	1	0,5	≤ 0,25
SPL	90	92	95	97	100	102	105	110	115

2 – Especificações Técnicas

São apresentados os primeiros dados numéricos referentes ao produto.

• Diâmetro nominal	380	15	mm	pol.	1 - Programa musical e voz, com distorção harmônica máxima no amplificador de 5%, sendo a potência calculada em função da tensão na saída do amplificador e da impedância nominal do transdutor.
• Impedância nominal	8		Ohms		
• Impedância mínima @ 180 Hz	6,4		Ohms		
• Potência de Programa Musical ¹	700		Watts		2 - Norma Brasileira NBR 10.303, com a aplicação de ruído rosa durante 2 horas ininterruptas.
• Potência RMS (NBR 10.303) ²	350		Watts		
• Potência AES ³	350		Watts		
• Sensibilidade média (2,83 V @ 1m) entre 100 e 2000 Hz	98		dB	SPL	3 - Norma AES (60 - 600 Hz).
• Compressão de potência @ 0 dB (pot. nom.)	3,0		dB		
• Compressão de potência @ -3 dB (pot. nom.)/2	1,9		dB		
• Compressão de potência @ -10 dB (pot. nom.)/10	0,6		dB		
• Resposta de frequência @ -10 dB	40 a 3000 Hz		Hz		

Comentários às Especificações Técnicas

• Diâmetro Nominal

O diâmetro que classifica o falante. Igual ou próximo do diâmetro real.

• Impedância nominal

A impedância desejada para o falante. A que ele teria se apresentasse um comportamento puramente resistivo, em sua curva de impedância, ao longo de toda a faixa de áudio (20 Hz a 20 kHz).

Valores geralmente disponíveis: 8, 4 e 16 Ohms.

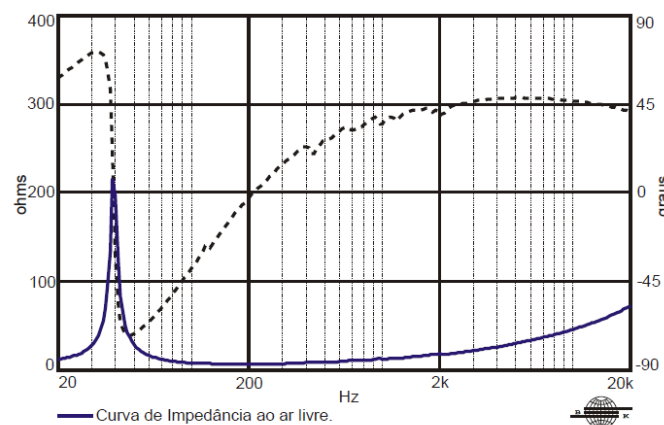
• Impedâncias Máxima e Mínima

Na *primeira ressonância*, também chamada de *ressonância mecânica*, que acontece na frequência F_s , a impedância vista pelos terminais da bobina passa por um valor máximo, muitas vezes maior que a impedância nominal.

Já na *segunda ressonância*, a impedância é mínima, da mesma ordem de grandeza que a impedância nominal, e muito próxima da resistência da bobina.

Enquanto a primeira ressonância é caracterizada por um pico elevado e estreito, a segunda ressonância assemelha-se a um vale bastante largo.

A fase é nula nas frequências de ressonância.



Módulo e fase da impedância vista pela bobina.

• Potência de Programa Musical

Alto-falantes foram feitos para reproduzir sinais musicais e de voz, na maioria das aplicações. Assim sendo, nada mais coerente que sejam testados com música.

Os sinais musicais apresentam uma potência de pico (máxima) e uma potência média (*erradamente chamada RMS*), sendo o cociente entre elas o *Fator de Crista*: $FC = P_{MAX} / P_{ME} = (E_{MAX} / E_{RMS})^2$.

Músicas de diferentes estilos apresentam fatores de crista próximos de 10, desde que não tenham sido “remixadas”, com a adição de um conteúdo acentuado de baixas frequências.

A potência musical testa a robustez mecânica da falante. Quando é reprovado neste teste, o cone rasga, ou vinca; o enrolamento da bobina se separa da forma (a forma fica e a bobina vai ...), a suspensão e/ou a aranha se danificam. Tudo isso se deve aos grandes esforços provocados pela aceleração do cone, uma vez que *força é igual ao produto da massa pela aceleração*.

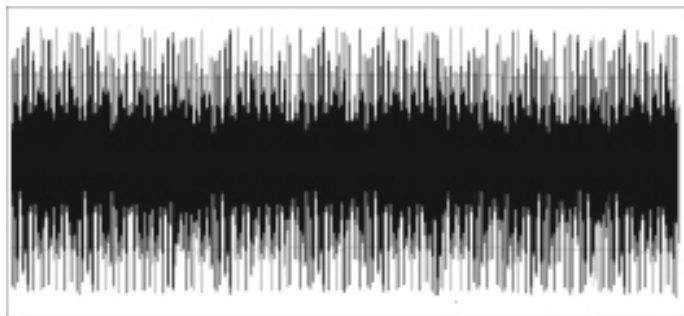
A potência musical, devido ao elevado fator de crista dos sinais musicais ($\cong 10$), produz muito pouco calor, uma vez que a potência média é 10 vezes menor que a de pico). Assim, 1000 watts de pico produzirão apenas 100 Watts (que irão gerar calor) de potência média, para um Fator de Crista, típico, igual 10.

A *potência musical* é definida como *o dobro da potência média* sendo a *potência de pico* o quádruplo da *potência média*, o que é verdadeiro para um sinal musical com *6 dB de Fator de Crista*, como o ruído rosa comprimido, usado nos testes das normas NBR 10303, IEC-268, DIN e AES2 – 1984.

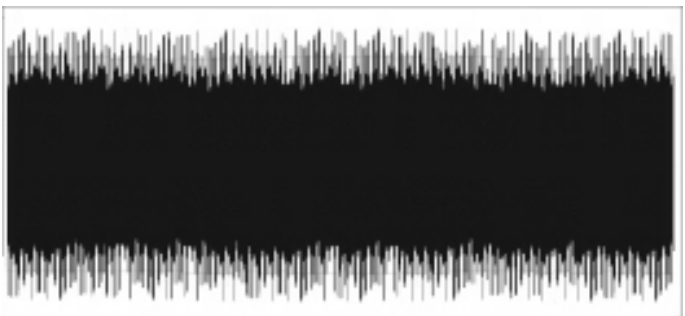
• Potência Média

Erradamente chamada de RMS (Root Mean Square, ou seja, raiz quadrada da média dos valores ao quadrado, esta potência é resultado de uma média puramente aritmética, e não quadrática, como estaria indicando erradamente a nomenclatura.

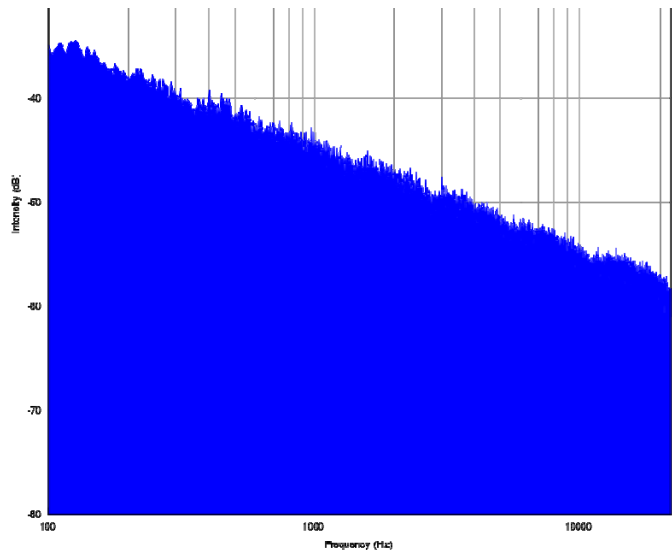
Seu efeito principal é produzir calor na bobina do falante, que pode ser carbonizada por isso.



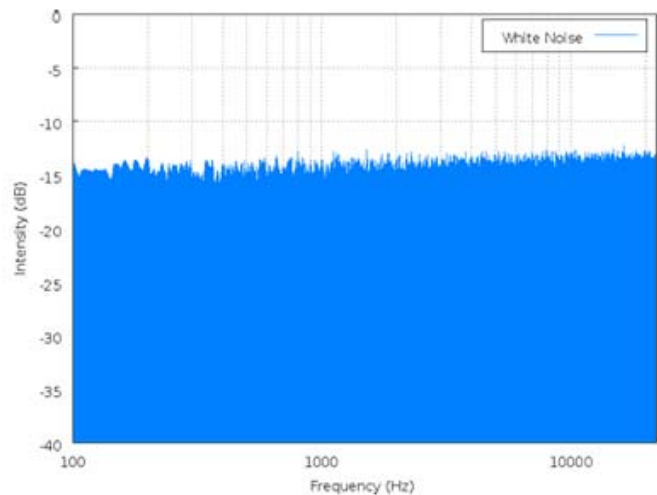
Ruído rosa com FC = 12 dB.



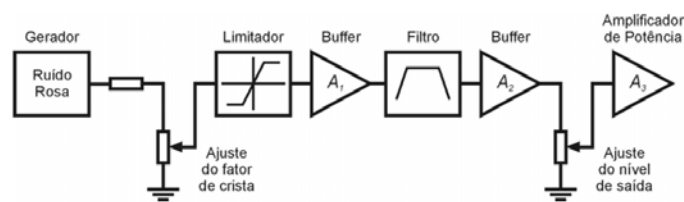
Ruído rosa com FC = 6 dB, usados nas normas IEC 268, DIN 45573, AES e NBR 10303.



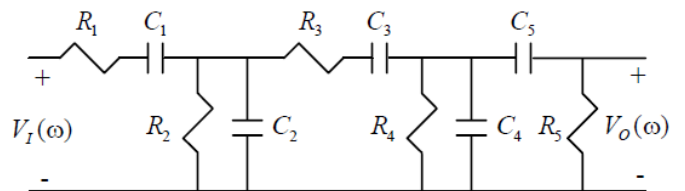
Ruído rosa: mesma energia por banda (aten. $3\text{ dB} / 8^a$).



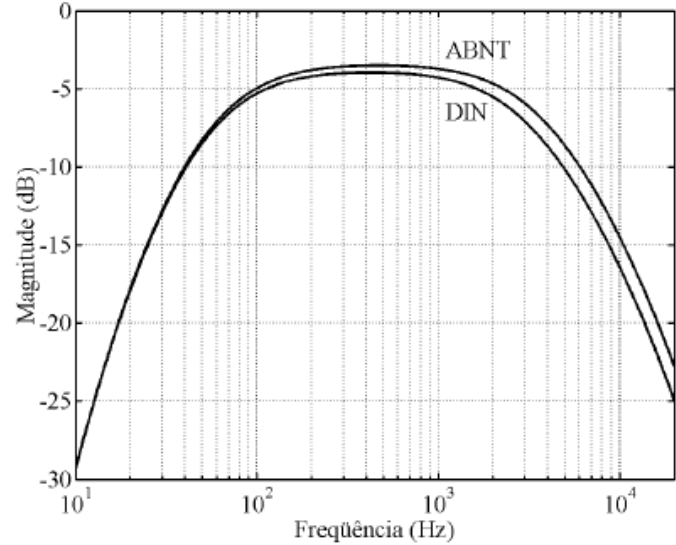
Ruído branco: mesma energia por frequência.



Compressão, filtragem e amplificação do ruído rosa.



Circuito de filtro.



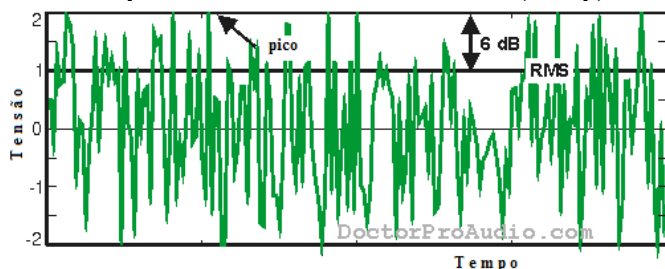
Curvas de resposta dos filtros ABNT e DIN (alemã).

Componente	ABNT 10303	DIN 45573
R_1	$330\ \Omega$	$4,3\text{ k}\Omega$
C_1	$2,2\ \mu\text{F}$	$0,22\ \mu\text{F}$
R_2	$3,3\text{ k}\Omega$	$33\text{ k}\Omega$
C_2	$0,09\ \mu\text{F}$	$0,0091\ \mu\text{F}$
R_3	$330\ \Omega$	$3,3\text{ k}\Omega$
C_3	$2,2\ \mu\text{F}$	$0,22\ \mu\text{F}$
R_4	$3,3\text{ k}\Omega$	$33\text{ k}\Omega$
C_4	$0,068\ \mu\text{F}$	$0,0068\ \mu\text{F}$
R_5	$10\text{ k}\Omega$	$100\text{ k}\Omega$
C_5	$0,47\ \mu\text{F}$	$0,047\ \mu\text{F}$

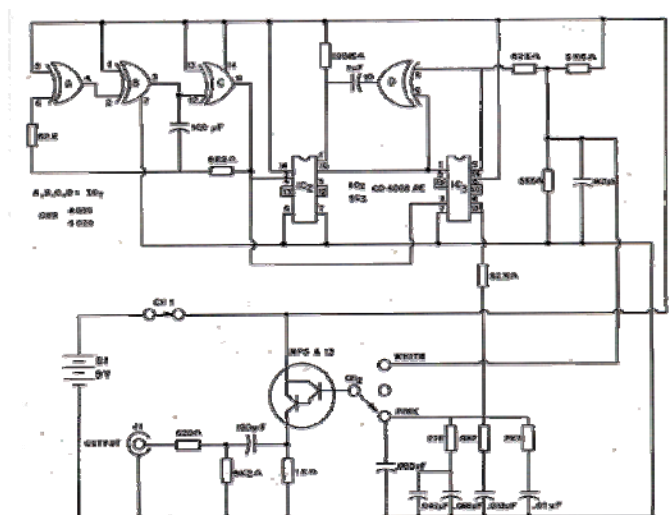
Valores dos componentes usados nos circuitos de filtro.



Compressor utilizando diodos 1N4148 (clamp).



Ruído rosa com Fator de Crista reduzido para 6 dB.



Gerador de ruído branco / rosa, pseudo aleatório.

Muitas normas de medição, como NBR 10303 e AES, utilizam ruído rosa, comprimido pela presença de diodos de “clamp”, que limitam a amplitude dos picos do sinal em $\pm 0,7$ Volts (depois amplificado para o nível desejado), o que reduz o fator de crista de 12 para 6 dB, elevando consideravelmente a potência média.

O ruído rosa é a opção mais simples disponível para simular um sinal musical.

Código ABNT NBR 10303:1988 CANCELADA

Código Secundário : ABNT/MB 2828

Data de Publicação : 30/05/1988

Título : Alto-falantes - Comprovação de potência elétrica admissível - Método de ensaio

Comitê : ABNT/CB-03 Eletricidade

Nº de Páginas : 6

Status : Cancelada em 09/06/2011

Idioma : Português

Motivo do Cancelamento : Esta Norma não é mais utilizada pelo setor.

Organismo : ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Objetivo : Esta Norma prescreve o método de ensaio para determinação de potência elétrica RMS, admissível, em alto-falantes.

Nota de falecimento da NBR 10303.

Embora nada impeça que os procedimentos preconizados pela extinta Norma NBR 10303 continuem a ser utilizados na avaliação de produtos, a verdade é que ela foi extinta e não tem, pelo menos ainda, substituta. Possível explicação para o fato: o mercado de alto-falantes não tem importância econômica, como o de brinquedos, nem o apelo popular da certificação do copo de chopp ou das camisinhas ...

• Potência AES2-1984 standard

A Norma AES2-1984, publicada pela *Audio Engineering Society*, também utiliza ruído rosa, com 6 dB de Fator de Crista, como a NBR 10303, a IEC-268 e a DIN. Difere apenas na especificação da banda passante, que é de uma década, escolhida pelo usuário. Por exemplo: se a frequência de ressonância do falante em teste, F_s , vale 50 Hz, a banda passante escolhida provavelmente seria de 50 Hz a 500 Hz. Já um driver de compressão poderia ser avaliado no intervalo de 1 kHz a 10 kHz, e assim por diante.

A duração do teste é de duas horas, após as quais o componente não pode apresentar danos. Este mesmo critério, e intervalo de tempo, é utilizado pelas normas NBR 10303, IEC-268 e DIN.

• Potência Contínua

Indica que o sinal de teste está presente todo o tempo, durante o intervalo de duração do teste. Isso às vezes precisa ser dito, pois existem testes em que o sinal é intermitente, como na norma 33/66, onde o falante é energizado por 33 ms e descansa 66 ms.

• Sensibilidade 2,83V@1m

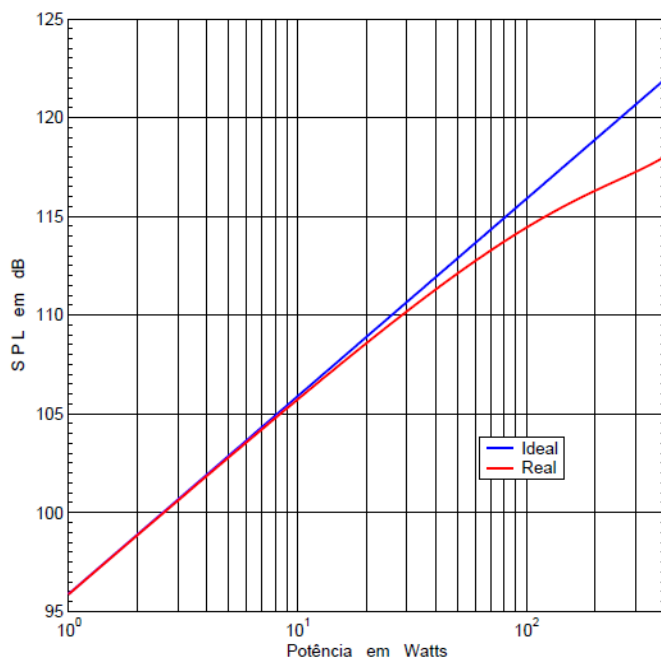
A sensibilidade, em dB, é o valor do SPL, produzido a uma distância de um metro do transdutor, quando este é excitado por um sinal com 1 Watt de potência.

Como $P = E^2 / R$ e $E = \sqrt{P \cdot R}$, em uma resistência de 8 Ohms precisamos de uma tensão igual a $\sqrt{8}$ Volts, ou seja, 2,83 V, para produzir 1 Watt. Esse é o valor de tensão que deve ser aplicado nos transdutores de 8 Ohms para a medição da sensibilidade. Já um falante de 2 Ohms deverá receber 2 V e outro de 16 Ohms, 4 V.

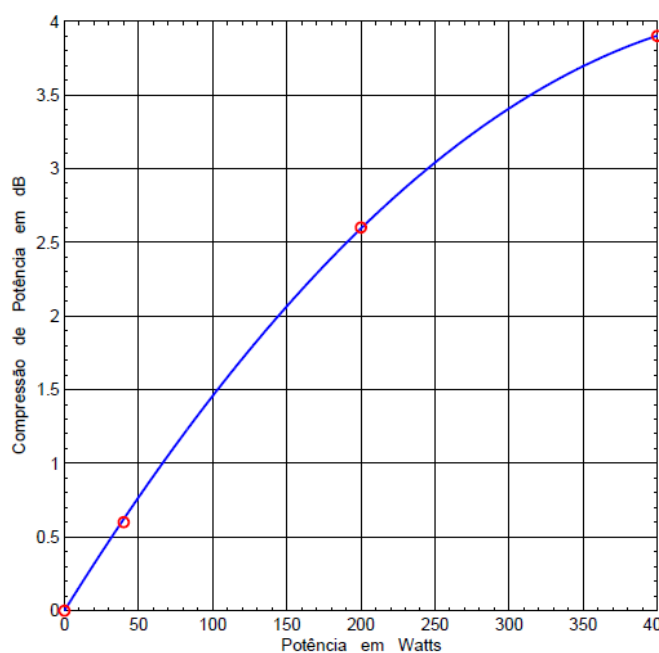
• Compressão de potência

Retrata a redução na eficiência, que ocorre no transdutor, à medida que maiores valores de potência elétrica são aplicados. A principal razão para isso está no aumento da resistência da bobina, com a elevação da temperatura, provocada pela potência aplicada.

Alguns fabricantes fornecem os valores da compressão de potência para 3 diferentes níveis: **potência máxima (0 dB)**, **metade da potência (-3 dB)** e **um décimo da potência (-10 dB)**. Falantes de médios, onde o deslocamento do cone é muito menor que nos woofers, não se beneficiam da refrigeração proporcionada pela movimentação do ar e podem apresentar valores elevados de compressão de potência.



SPL sem compressão de potência (ideal) e com (real).



Compr. de Pot. em P_{MAX} , $P_{MAX}/2$, $P_{MAX}/10$ e 0 Watt.

• Resposta de frequência @ -10 dB

O nível de - 10 dB (um décimo da potência) é considerado a referência comercial de banda passante, enquanto que - 3 dB (metade da potência) é a referência técnica para bandas passantes e respostas. Assim, uma banda passante de 40 Hz a 3kHz, @ - 10 dB significa que no início da faixa de resposta (40 Hz) e no fim da mesma (3 kHz), os níveis são iguais a - 10 dB, em relação à região plana central.

Em tempo: o símbolo @ , dito arroba, em português, significa **at** , em inglês.

3 – Parâmetros Thiele-Small

São fornecidos os parâmetros propostos por Neville Thiele e Richard H. Small, referentes ao produto.

•	Fs	Frequência de Ressonância	40	Hz	
•	Qms	Fator de Qualidade Mecânico	16,82	-	
•	Qes	Fator de Qualidade Elétrico	0,41	-	
•	Qts	Fator de Qualidade Total	0,40	-	
•	Sd	Área efetiva do cone	0,08605	m ²	
•	T _A	Temperatura Ambiente	25	°C	
•	Pa	Condições Atmosféricas	Pressão Atmosférica	1016	mb
•	UR	Umidade Relativa do Ar	51	%	
•	Vas	Volume equivalente do Falante	190	litros	
•	Vd	Volume de ar deslocado Sd · X _{MAX}	490	cm ³	
•	η _O	Eficiência de referência em ½ espaço	2,90	%	
•	X _{MAX}	Deslocamento máximo (pico) com 10 % de distorção	5,7	mm	
•	X _{LIM}	Deslocamento máximo (pico) antes do dano	12,0	mm	

1 Parâmetros de Thiele-Small medidos após amaciamento de 2 horas com metade da potência NBR.

2 Admite-se uma tolerância de ± 15% nos valores especificados acima.

Comentários aos Parâmetros de Thiele – Small

Albert Neville Thiele nasceu em 4 de dezembro de 1920, em Brisbane, Queensland, e faleceu em 1 de outubro de 2012, tendo estudado nas Universidades de Queensland e Sydney. Apresentou-se, na década de 30, nas rádios de Brisbane como soprano e, mais tarde, como ator, havendo adquirido grande interesse na reprodução e transmissão de informações sonoras.

Após cinco anos de serviço na infantaria e no corpo de Engenheiros Elétricos e Mecânicos, durante a guerra, obteve o título de Bacharel em Engenharia Mecânica e elétrica, em 1952. Trabalhou 10 anos na EMI australiana projetando equipamentos de áudio e vídeo e na Australian Broadcasting Corporation por 23 anos. Seu trabalho "Loudspeakers in Vented Boxes", lançado em 1961, na Austrália, foi republicado, por sugestão de Small, em 1971 no JAES, tornando-se notório. Em 1994 recebeu a medalha de prata da AES como pioneiro na área de simulação de alto-falantes.



Richard H. Small graduou-se Bachelor of Science no California Institute of Technology em 1956, obtendo o título de Master of Science em engenharia elétrica pelo MIT, em 1958. Trabalhou no projeto de circuitos eletrônicos de alto desempenho, no centro de pesquisas da Bell & Howell, na Califórnia, de 1958 até 1964 quando, após uma visita de trabalho ao Japão, mudou-se para a Austrália. Ph.D. em 1972, pela Universidade de Sidney, ali le-

cionou por doze anos.

Seus trabalhos fundamentais, continuando e ampliando o trabalho de Thiele, foram publicados entre 1971 e 1972 no Journal da AES. Em 1986 retornou à indústria, chefiando o departamento de pesquisa da KEF até 1993, indo ocupar o cargo de Engenheiro Sênior na Harman/Becker, em Indiana. É membro do IEEE e da AES, onde recebeu as medalhas de prata e ouro pelos trabalhos publicados.

Até março de 1961, quando o engenheiro australiano A. Neville **Thiele** apresentou o seu trabalho "Loudspeakers in Vented Boxes" na Radio and Electronic Engineering Convention, realizada em Sidney, Austrália (em agosto desse mesmo ano foi publicado no Proceedings of IRE Australia), o projeto de caixas acústicas do tipo Refletor de Graves (denominada Bass Reflex, em inglês, caracterizadas por possuírem uma abertura chamada pórtilho, onde, muitas vezes, é instalado um tubo denominado duto) era algo nebuloso, contraditório e envolto em profundo mistério. Para se ter uma idéia, até então, ninguém havia respondido, de forma clara e objetiva, a algumas perguntas básicas, tais como:

Qual o volume ideal para a caixa ?

Em que frequência o duto deve ser sintonizado ?

Qual o valor ideal para a impedância de saída do amplificador ?

Somente após o trabalho pioneiro e inovador de Thiele é que essas, e muitas outras perguntas foram cabalmente respondidas, tendo Small dado prosseguimento ao trabalho original de Thiele.



Richard H. Small e Homero Sette Silva palestrando na Audio Engineering Society, no Chile, em outubro de 2008.

• Frequência de Ressonância F_s

Nesta frequência a impedância passa por um máximo (pico) cuja frequência, amplitude, e largura são utilizados para determinar os parâmetros F_s e Q_{ms} , a partir dos quais os valores de Q_{es} e Q_{ms} podem ser facilmente calculados. A fase é igual a zero, na ressonância.

A frequência de ressonância F_s é também chamada de ressonância mecânica, pois depende de dois parâmetros mecânicos: a massa do conjunto móvel, M_{ms} , em Kg, e a compliância da suspensão, C_{ms} , em m / N , sendo dada pela equação $F_s = 1 / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}$, análoga à de um circuito ressonante série.

Exemplo:

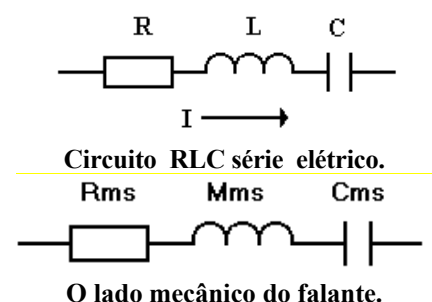
$$M_{ms} = 84,6 \text{ g} \Rightarrow 84,6/1000 = 0,0846 \text{ Kg} ; C_{ms} = 183,9 \text{ } \mu\text{m} / \text{N} \Rightarrow 183,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} / \text{N}$$

$$F_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,0846 \cdot 183,9 \cdot 10^{-6}}} = 40,35 \text{ Hz}$$

• Fator de Qualidade Mecânico Q_{ms}

O conceito de Fator de Qualidade vem dos circuitos elétricos, sendo definido como o cociente *Potência Reativa / Potência Real*, que se confunde com a razão *Energia Armazenada / Energia Dissipada*, uma vez que energia é igual ao produto da potência pelo tempo.

Em um circuito série, onde a corrente é a mesma em todos os componentes, esta relação seria dada por $Q_{SER} = X \cdot I^2 / R \cdot I^2 = X / R$, onde X representa a parte reativa do circuito, e R sua parte resistiva.



Para um circuito paralelo, onde a tensão é comum a todos os componentes, o fator de qualidade é dado por $Q_{PAR} = (E^2 / X) / (E^2 / R) = R / X$. Sendo o fator de qualidade determinado na frequência de ressonância do circuito ($\omega_R = 2 \cdot \pi \cdot F_R$), *situação em que as partes reativas se anulam*, ou seja, as reatâncias indutiva e capacitiva têm o mesmo módulo, e sinais contrários, os fatores de qualidade, para circuitos série e paralelo, podem ser expressos como: $Q_{SER} = \omega_R \cdot L / R = 1 / \omega_R \cdot R \cdot C$; $Q_{PAR} = R / \omega_R \cdot L = \omega_R \cdot R \cdot C$, respectivamente.

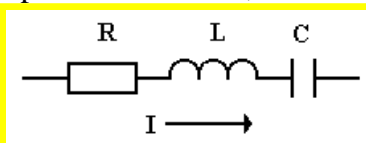
No lado mecânico do alto-falante, temos:

$R = R_{ms}$

$L = M_{ms}$

$C = C_{ms}$

Resultado das analogias *força-tensão*, ou seja, R_{ms} é uma resistência mecânica, em Kg/s, M_{ms} é a massa móvel do conjunto móvel, em Kg e C_{ms} a compliância mecânica da suspensão em metro por Newton (na prática geralmente expressa em $\mu m / N$), todas elas grandezas mecânicas porem análogas aos respectivos componentes elétricos, conforme a analogia.



Circuito RLC série, elétrico.

$$Q_{SER} = X \cdot I^2 / R \cdot I^2 = X / R$$

$$Q_{SER} = \omega_R \cdot L / R = 1 / \omega_R \cdot R \cdot C$$

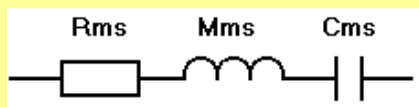
Fator de Qualidade, Circuito Série

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot F_s = \frac{1}{\sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}}$$

$$Q_{ms} = \frac{\omega_s \cdot M_{ms}}{R_{ms}}$$

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{M_{ms} / C_{ms}}}{R_{ms}}$$

Fator de Qualidade Mecânico



O lado mecânico do falante.

$$Q_{PAR} = (E^2 / X) / (E^2 / R) = R / X$$

$$Q_{PAR} = R / \omega_R \cdot L = \omega_R \cdot R \cdot C$$

Fator de Qualidade, Circuito Paralelo

Exemplo:

Calcule o Fator de Qualidade Mecânico de um falante onde a massa do conjunto móvel, M_{ms} , vale 84,6 gramas, a compliância mecânica da suspensão, C_{ms} , é igual a 183,9 $\mu m / N$ e a resistência mecânica da suspensão, R_{ms} vale 1,3 Kg/s.

$$Q_{ms} = \frac{\sqrt{M_{ms} / C_{ms}}}{R_{ms}} = \frac{\sqrt{84,6 \cdot 10^{-3} / 183,9 \cdot 10^{-6}}}{1,3} = 16,5$$

Análogos Elétricos

Comparando a equação da força f aplicada em um corpo de massa M , sujeito a uma variação de velocidade dv em um intervalo de tempo dt (ou seja, submetido a uma aceleração), vemos que tem o mesmo aspecto que outra, que retrata a tensão e em uma indutância L , sujeita a uma variação de corrente di , em um infinitésimo de tempo dt .

$$e_{(t)} = L \cdot \frac{di_{(t)}}{dt}$$

$$f_{(t)} = M \cdot \frac{dv_{(t)}}{dt}$$

ELÉTRICO

Tensão e
Volt

Corrente i
Ampere

Resist. Elétrica R
Ohms

Impedância Elétrica Z
 e / i
Ohms

Carga Elétrica q
Coulomb

Indutância L
Henry

Capacitância C
Farad

MECÂNICO

Força f
Newton

Velocidade v
 m / s

Resist. Mecânica R_m
 $N \cdot s / m = Kg / s$

Imp. Mecânica Z_m
 f / v
 $N \cdot s / m = Kg / s$

Deslocamento x
 m

Massa M
Kg

Compliância C_m
 m / N

ACÚSTICO

Pressão Acústica p
 N / m^2

Vel. Volumétrica u
 m^3 / s

Resist. Acústica R_a
 $N \cdot s / m^5 = Kg \cdot s / m^4$

Imp. Acústica Z_a
 p / u
 $N \cdot s / m^5 = Kg \cdot s / m^4$

Volume Deslocado U
 m^3

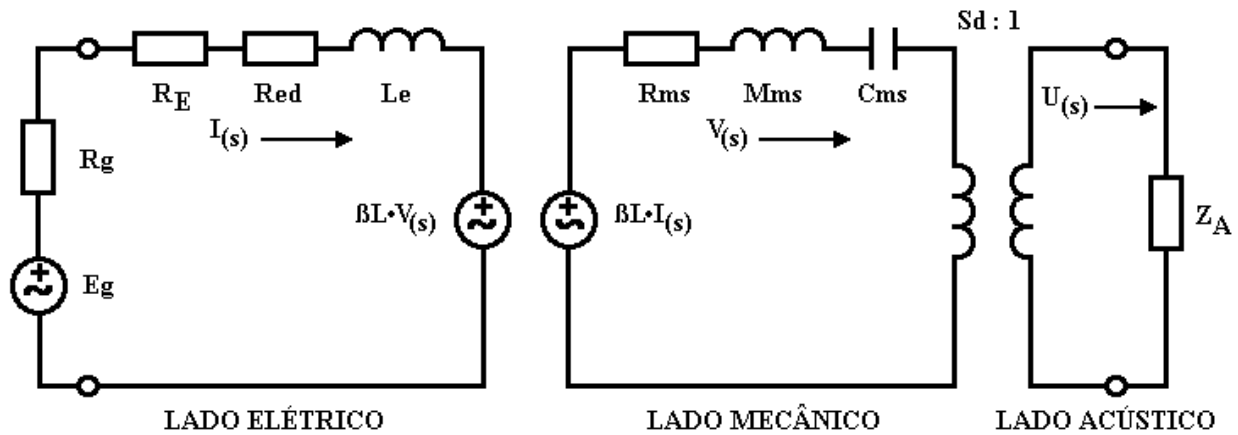
Massa Acústica Ma
 $Kg / m^4 = N \cdot s^2 / m^5$

Compl. Acústica Ca
 m^5 / N

Análogos Elétricos do tipo Força-Tensão.

As quantidades dv , dt e di , denominadas diferenciais, representam, respectivamente, variações de tensão, tempo e corrente infinitamente pequenas (infinitésimos). Surge, assim, a chamada analogia **força-tensão**, que permite analisar o comportamento de sistemas mecânicos através de um análogo elétrico o que, em geral, é mais fácil de fazer e de compreender (uma outra possibilidade, seria um sistema baseado na analogia força-corrente, dual do primeiro, preferida em determinadas aplicações). Tais analogias podem ser estendidas a outros sistemas, como o acústico, conforme o Quadro 2.1.

Desse modo, a massa móvel do alto-falante (cone + bobina + massa de ar), denominada M_{ms} (Massa Mecânica do Speaker) será representada por uma indutância; a resistência mecânica, responsável pelas perdas na suspensão, denominada R_{ms} , embora sendo uma resistência mecânica, corresponderá a uma resistência elétrica, no circuito análogo; a compliância mecânica, C_{ms} , que corresponde ao inverso do coeficiente de elasticidade da mola (elastância), será representada pela capacitância C_{ms} .



Modelo equivalente do alto-falante utilizando fontes controladas.

• Fator de Qualidade Elétrico Q_{es}

O Fator de Qualidade Elétrico Q_{es} é dado pela expressão abaixo, onde βL é o fator de força, em $T \cdot m$:

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

A resistência $(\beta L)^2 / R_E$ é mecânica, expressa em Kg/s, resultado da reflexão da resistência R_E , em Ohms, do lado elétrico para o mecânico. De um modo geral, vale a relação $Z_E \cdot Z_M = (\beta L)^2$, para refletir impedâncias entre os lados elétrico e mecânico, e vice-versa.

A análise dimensional ao lado mostra que o produto $\beta \cdot L \cdot I$ é uma força, o que explica a denominação de fator de força, para o termo $\beta \cdot L$.

Fluxo magnético	Densidade de Fluxo Magnético
Weber = Wb = $\frac{Kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A}$	Tesla = $\frac{Wb}{m^2} = \frac{Kg}{s^2 \cdot A} = \beta$
$\beta \cdot L \cdot I = \frac{Kg}{s^2 \cdot A} \cdot m \cdot A = Kg \cdot \frac{m}{s^2} = \text{Newton}$	

Exemplo:

Calcule o Fator de Qualidade Elétrico de um falante onde a massa do conjunto móvel, M_{ms} , vale 84,6 gramas, a compliância mecânica da suspensão, C_{ms} , é igual a 183,9 $\mu m / N$, a resistência da bobina, R_E vale 5,5 Ohms e o fator de força, βL é igual a 17 $T \cdot m$.

$$Q_{es} = \frac{R_E \cdot \sqrt{M_{ms} / C_{ms}}}{(\beta L)^2} = \frac{5,5 \cdot \sqrt{84,6 \cdot 10^{-3} / 183,9 \cdot 10^{-6}}}{(17)^2} = 0,408$$

• Fator de Qualidade Total Qts

Os fatores de qualidade mecânico e elétrico retratam o comportamento do falante como se os lados mecânico e elétrico fossem independentes, o que não é verdade. O comportamento do transdutor será função da ação combinada de Qms e de Qes, fato retratado pelo fator de qualidade resultante, denominado Qts.

Assim, para a obtenção de Qts devemos somar a resistência Rms com a reflexão da resistência R_E , vinda do lado elétrico para o mecânico. O Qts é o resultado do "paralelo" de Qms com Qes. Como Qms costuma ser muito maior que Qes, então Qts será ligeiramente menor que Qes, ou seja, $Qts \cong Qes$.

Isso indica que o falante é amortecido pelo lado elétrico e não pelo mecânico.

$$Qts = \frac{\omega_s \cdot Mms}{\frac{(\beta L)^2}{R_E} + Rms} = \frac{\sqrt{Mms / Cms}}{\frac{(\beta L)^2}{R_E} + Rms} \quad \therefore \quad \frac{1}{Qts} = \frac{\frac{(\beta L)^2}{Re} + Rms}{\sqrt{Mms / Cms}} = \frac{\frac{(\beta L)^2}{Re}}{\sqrt{Mms / Cms}} + \frac{Rms}{\sqrt{Mms / Cms}}$$

$$\frac{1}{Qts} = \frac{1}{Qes} + \frac{1}{Qms} \quad \therefore \quad Qts = \frac{1}{\frac{1}{Qes} + \frac{1}{Qms}} = \frac{Qes \cdot Qms}{Qes + Qms} = \frac{Qes}{\frac{Qes}{Qms} + 1} \cong Qes \quad \text{para } Qms > Qes$$

Exemplo:

Calcule o Fator de Qualidade Total de um falante com $Qms = 16,5$ e $Qes = 0,408$.

$$Qts = \frac{Qes \cdot Qms}{Qes + Qms} = \frac{0,408 \cdot 16,5}{0,408 + 16,5} = 0,398$$

• Área efetiva do cone Sd

A área efetiva do cone, S_D , pode ser obtida medindo-se o diâmetro D, de centro a centro do anel da suspensão, e calculando a área $S_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$. Assim fazendo estamos considerando o diâmetro que efetivamente possui o falante sob o ponto de vista acústico e, por conseguinte, sua área efetiva projetada.

• Condições Atmosféricas

As condições atmosféricas alteram o meio ambiente acústico, que é o ar e, por conseguinte, afetam o comportamento do alto-falante.

Temperatura do Ar em °C		Pressão Atmosférica em mb		Umidade Relativa do Ar em %	
Parâmetro	Efeito	Parâmetro	Efeito	Parâmetro	Efeito
Velocidade do Som	Aumenta	Velocidade do Som	Independente	Velocidade do Som	Desprezível
Densidade do Ar	Diminui	Densidade do Ar	Aumenta	Densidade do Ar	Diminui
Eficiência	Diminui	Eficiência	Aumenta	Eficiência	Diminui
Vas	Independente	Vas	Aumenta	Vas	Diminui

Velocidade de Propagação do Som e Densidade do Ar Seco

A velocidade de propagação do som em um gás é dada por $C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}}$, onde:

C = Velocidade de Propagação do Som no Gás ; P = Pressão a que está submetido o gás

$$\gamma = \frac{\text{Calor Específico do Gás à Pressão Constante}}{\text{Calor Específico do Gás à Velocidade Constante}} = 1,402 \quad \text{para o ar}$$

$$\rho = \text{Densidade do Gás} = \frac{\text{Massa do Gás}}{\text{Volume do Gás}}$$

Supondo o ar um gás perfeito, aplica-se a lei dos gases, $\frac{P}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M}$, onde:

$$R = \text{Constante dos Gases Perfeitos} = 8.314,32 \quad [\text{Joule} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{Kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$T = \text{Temperatura Absoluta, em K} = T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15$$

$$M = \text{Peso Molecular do Gás} = 28,97 \quad (\text{Ar Seco}) \quad [\text{adimensional}]$$

$$\text{Substituindo } \frac{P}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M} \text{ em } C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P}{\rho}}, \text{ obteremos } C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \text{ através da qual podemos concluir que a}$$

velocidade de propagação do som em um gás é função apenas da temperatura absoluta, uma vez que as demais quantidades são constantes, para um determinado gás. Assim, caso haja uma variação na pressão do gás, e se a temperatura for mantida constante, a velocidade não se altera. Exemplificando: se a pressão for duplicada, a densidade do gás também será dobrada, o que mantém inalterado o cociente P/ρ e, por conseguinte, a velocidade C , desde que a temperatura não tenha variado.

Transformando a temperatura Celsius em absoluta, $T_{(\text{K})} = T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15$ obteremos a velocidade de propagação do som no ar seco, dada por:

$$C = \sqrt{\frac{1,402 \cdot 8314,32 \cdot [T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15]}{28,97}} = 20,059 \cdot \sqrt{T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15}$$

Para $T = 0^{\circ}\text{C}$, teremos o valor da velocidade de propagação do som a zero grau, denominada $C_{(^{\circ}\text{O})}$,

$$\text{representada por } C_{(^{\circ}\text{O})} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot 273,15}{M}} = \sqrt{\frac{1,402 \cdot 8314,32 \cdot 273,15}{28,97}} = 331,52 \text{ m/s}$$

$$\text{Assim poderemos obter outra forma para } C = C_{(^{\circ}\text{O})} \cdot \sqrt{1 + \frac{T_{(^{\circ}\text{C})}}{273,15}} = 331,52 \cdot \sqrt{1 + \frac{T_{(^{\circ}\text{C})}}{273,15}}.$$

$$C_{0^{\circ}} = 331,52 \pm 0,05 ; C_{20^{\circ}} = 343,3 ; C_{30^{\circ}} = 349,2 ; C_{40^{\circ}} = 354,9 \text{ m/s}$$

A densidade do ar seco ρ_0 , em Kg/m^3 , será dada por :

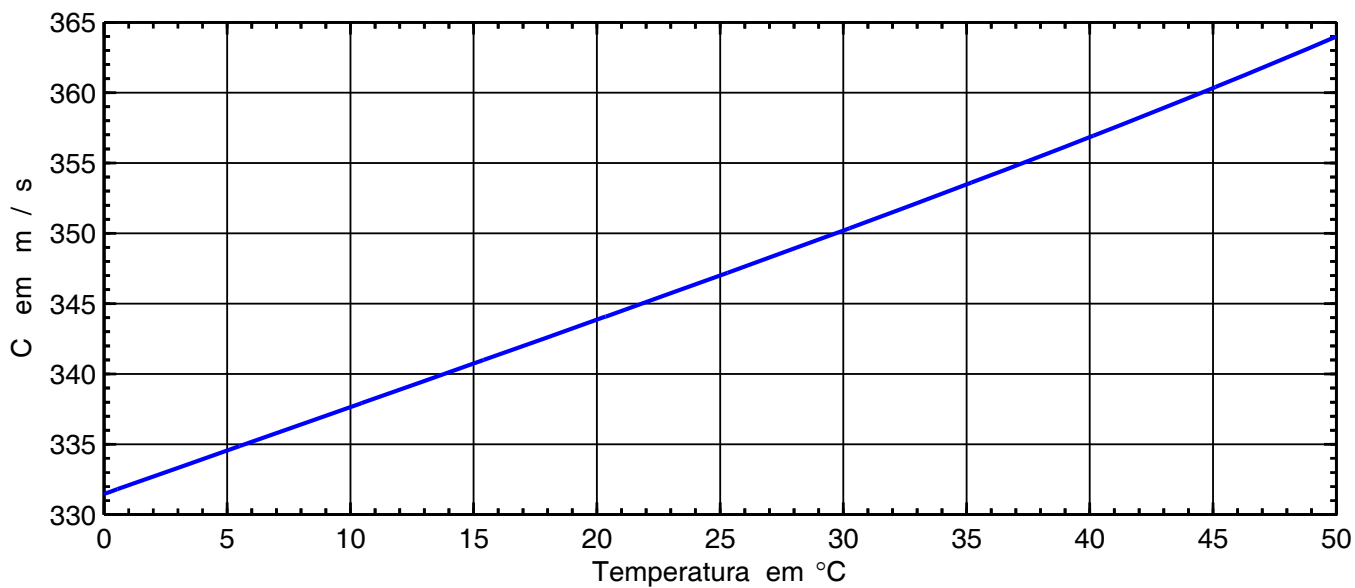
$$\rho_0 = \frac{M}{R} \cdot \frac{P}{T_{(\text{K})}} = \frac{M}{R} \cdot \frac{P}{T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15} = \frac{28,97}{8314,32} \cdot \frac{P}{T_{(^{\circ}\text{C})} + 273,15}$$

$$\rho_{0_{(0^{\circ})}} = 1,293 ; \rho_{0_{(20^{\circ})}} = 1,205 ; \rho_{0_{(40^{\circ})}} = 1,128 \quad [\text{Kg/m}^3]$$

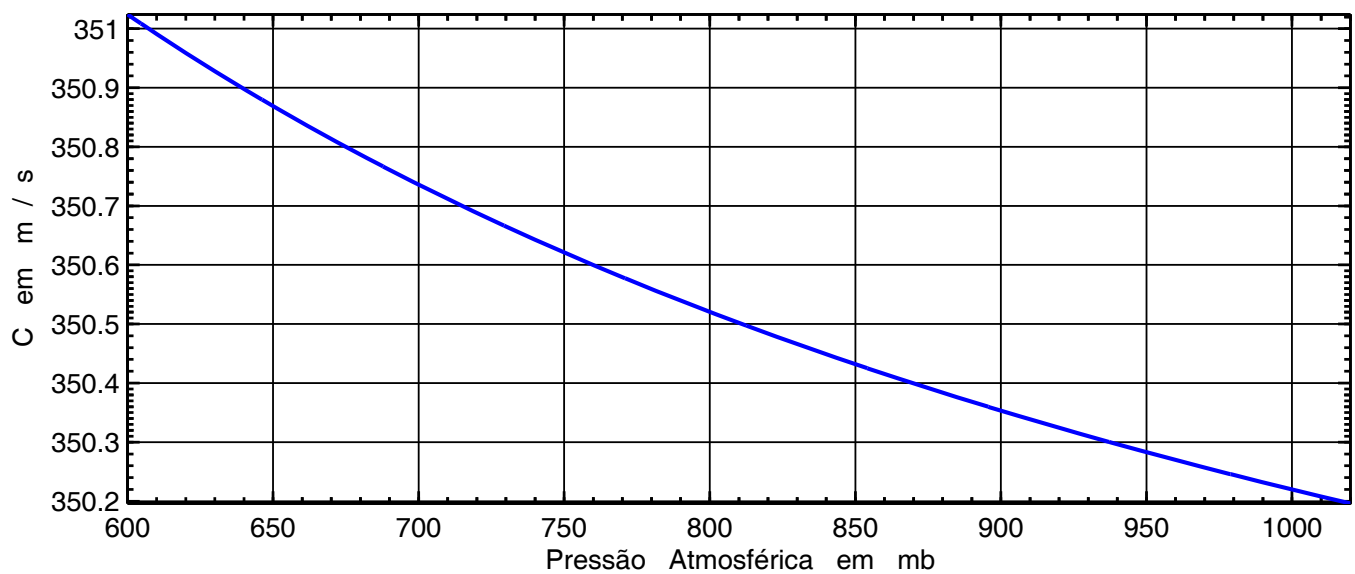
Produto $\rho \cdot C^2$

O produto da densidade do ar ρ , pelo quadrado da velocidade do som C , utilizado no cálculo do Volume Equivalente do Falante, *Vas*, *independe da temperatura*, conforme demonstrado abaixo, sendo diretamente proporcional à pressão atmosférica e muito pouco influenciado pela umidade relativa do ar.

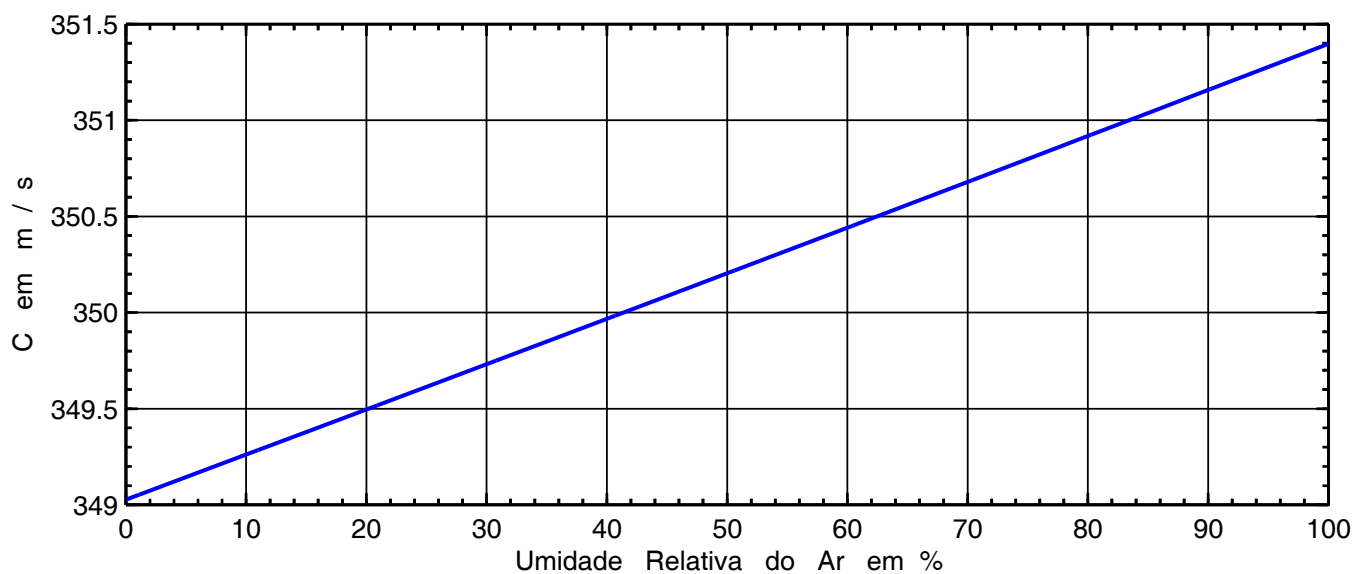
$$C = 331,52 \cdot \sqrt{\frac{273,15 + T_{(^{\circ}\text{C})}}{273,15}} \therefore C^2 = 331,52^2 \cdot \frac{273,15 + T_{(^{\circ}\text{C})}}{273,15} ; \rho = \frac{2900 \cdot P_{(\text{mb})}}{8314,32 \cdot [273,15 + T_{(^{\circ}\text{C})}]}$$



Velocidade do som no ar, em função da temperatura. $P = 1013 \text{ mb}$ e $U = 50 \%$.



Velocidade do som no ar, em função da pressão atmosférica. $T = 30 \text{ °C}$ e $U = 50 \%$. Efeito desprezível.



Velocidade do som no ar, em função da umidade relativa do ar. $T = 30 \text{ °C}$ e $P = 1013 \text{ mb}$. Efeito desprezível.

$$\rho \cdot C^2 = \frac{2900 \cdot 331,52^2 \cdot P_{(mb)}}{8314,32 \cdot [273,15 + T_{(eC)}]} \cdot \frac{273,15 + T_{(eC)}}{273,15} = \frac{2900 \cdot 331,52^2 \cdot P_{(mb)}}{8314,32 \cdot 273,15} = 140,3426 \cdot P_{(mb)}$$

Para calcular $\rho \cdot C^2$ basta conhecer a pressão atmosférica em milibares (ou hecto Pascal).

(Pressões atmosféricas P em: Pascal = Newton / m², mili Bares e Atmosferas)

1000 mb = 10⁵ N/m² = 10⁵ Pa = 0,9869 atm = 750,06 mm Hg.

1 atm = 760 mm Hg = 1013,25 mb = 101325 Pascal

• Volume Equivalente do Falante Vas

Representa o volume de ar que possui o mesmo efeito de mola (compliância) que a suspensão do falante. É dado pela equação $Vas = \rho \cdot C^2 \cdot Cms \cdot S_D^2$, em m³ (geralmente convertido para litros), onde:

S_D = área efetiva do cone, em m²; ρ = densidade do ar em Kg / m³; C = Velocidade do som no ar em m/s.

$$\rho \cdot C^2 = 140,3426 \cdot P_{(mb)} \Rightarrow Vas = 140,3426 \cdot S_D^2 \cdot Cms \cdot P_{(mb)}$$

Exemplo:

Para uma área efetiva do cone, S_D igual a 0,08605 m², compliância mecânica da suspensão Cms igual a 183,9 µm / N, temperatura ambiente de 25 °C e pressão atmosférica de 1016 mili Bares (mb), desprezando a umidade, temos:

$$Vas = 140,3426 \cdot S_D^2 \cdot Cms \cdot P_{(mb)} = 140,3426 \cdot 0,08605^2 \cdot 183,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1016 = 0,1942 \text{ m}^3$$

Para converter de metros cúbicos para litros basta multiplicar por 1000:

$$Vas = 0,1942 \text{ m}^3 \Rightarrow 0,1942 \cdot 1000 = 194,2 \text{ L}$$

• Volume de ar deslocado Vd

O volume de ar deslocado é igual ao produto da área pelo deslocamento do cone, S_D · X.

Seu valor máximo é igual a S_D · X_{MAX}. Os volumes de ar deslocados pelo cone em movimento não podem ser confundidos com o volume de ar ocupado pelo falante, na caixa acústica, nem com Vas.

• Eficiência de Referência em ½ Espaço

Um falante ideal, com 100 % de eficiência, recebendo uma potência elétrica de 1 Watt, produziria (se existisse !) uma potência acústica também igual a 1 Watt.

Como a *Intensidade Sonora* é dada pelo cociente *Potência Acústica / Área*, supondo-se que o falante se comporte como uma fonte pontual, montada em um baffle infinito, ou seja, irradiando em meio espaço (metade da área da esfera: $4 \cdot \pi \cdot r^2 / 2 = 2 \cdot \pi \cdot r^2$), a *Intensidade Sonora* a 1 metro será igual a 1 / 2 · π Watts por metro quadrado, com 1 Watt de potência aplicada.

Sendo a referência de *Intensidade Sonora* igual a 10⁻¹² W / m², e sabendo-se que a *Intensidade Sonora*, em dB, é numericamente igual ao Nível de Pressão Acústica, em dB SPL, o valor do SPL, em dB a 1 W / 1 m, em meio espaço, será dado por :

$$SPL_{(100\%, 1W @ 1m)} = 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{1}{\frac{2 \cdot \pi}{10^{-12}}} \right) = 112,0182 \cong 112 \text{ dB}$$

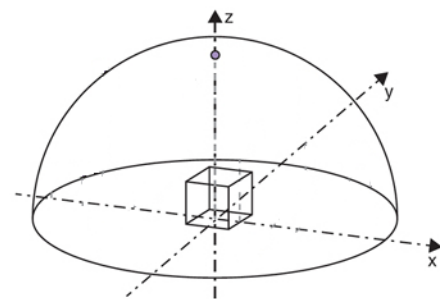


Fig. 22 - Meio Espaço.

Assim, 112 dB é o nível de pressão acústica que seria produzido por um falante, com 100 % de eficiência, alimentado com 1 Watt, irradiando em meio espaço, e medido a 1 metro de distância.

Sensibilidade em dB SPL e Eficiência % , em ½ Espaço.

dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %
82	0,0996	86,6	0,2872	91,2	0,8283	95,8	2,3888	100,4	6,8894	105	19,8692
82,1	0,1019	86,7	0,2939	91,3	0,8476	95,9	2,4444	100,5	7,0498	105,1	20,3320
82,2	0,1043	86,8	0,3007	91,4	0,8673	96	2,5014	100,6	7,2141	105,2	20,8056
82,3	0,1067	86,9	0,3077	91,5	0,8875	96,1	2,5596	100,7	7,3821	105,3	21,2902
82,4	0,1092	87	0,3149	91,6	0,9082	96,2	2,6193	100,8	7,5541	105,4	21,7861
82,5	0,1117	87,1	0,3222	91,7	0,9294	96,3	2,6803	100,9	7,7300	105,5	22,2936
82,6	0,1143	87,2	0,3297	91,8	0,9510	96,4	2,7427	101	7,9101	105,6	22,8129
82,7	0,1170	87,3	0,3374	91,9	0,9732	96,5	2,8066	101,1	8,0943	105,7	23,3442
82,8	0,1197	87,4	0,3453	92	0,9958	96,6	2,8720	101,2	8,2829	105,8	23,8880
82,9	0,1225	87,5	0,3533	92,1	1,0190	96,7	2,9389	101,3	8,4758	105,9	24,4444
83	0,1254	87,6	0,3616	92,2	1,0427	96,8	3,0073	101,4	8,6732	106	25,0138
83,1	0,1283	87,7	0,3700	92,3	1,0670	96,9	3,0774	101,5	8,8752	106,1	25,5965
83,2	0,1313	87,8	0,3786	92,4	1,0919	97	3,1491	101,6	9,0820	106,2	26,1927
83,3	0,1343	87,9	0,3874	92,5	1,1173	97,1	3,2224	101,7	9,2935	106,3	26,8028
83,4	0,1375	88	0,3964	92,6	1,1434	97,2	3,2975	101,8	9,5100	106,4	27,4271
83,5	0,1407	88,1	0,4057	92,7	1,1700	97,3	3,3743	101,9	9,7315	106,5	28,0660
83,6	0,1439	88,2	0,4151	92,8	1,1972	97,4	3,4529	102	9,9582	106,6	28,7197
83,7	0,1473	88,3	0,4248	92,9	1,2251	97,5	3,5333	102,1	10,1901	106,7	29,3887
83,8	0,1507	88,4	0,4347	93	1,2537	97,6	3,6156	102,2	10,4275	106,8	30,0732
83,9	0,1542	88,5	0,4448	93,1	1,2829	97,7	3,6998	102,3	10,6704	106,9	30,7737
84	0,1578	88,6	0,4552	93,2	1,3127	97,8	3,7860	102,4	10,9189	107	31,4905
84,1	0,1615	88,7	0,4658	93,3	1,3433	97,9	3,8742	102,5	11,1733	107,1	32,2240
84,2	0,1653	88,8	0,4766	93,4	1,3746	98	3,9644	102,6	11,4335	107,2	32,9746
84,3	0,1691	88,9	0,4877	93,5	1,4066	98,1	4,0568	102,7	11,6998	107,3	33,7427
84,4	0,1731	89	0,4991	93,6	1,4394	98,2	4,1513	102,8	11,9724	107,4	34,5287
84,5	0,1771	89,1	0,5107	93,7	1,4729	98,3	4,2480	102,9	12,2512	107,5	35,3329
84,6	0,1812	89,2	0,5226	93,8	1,5072	98,4	4,3469	103	12,5366	107,6	36,1560
84,7	0,1854	89,3	0,5348	93,9	1,5423	98,5	4,4482	103,1	12,8286	107,7	36,9981
84,8	0,1897	89,4	0,5472	94	1,5783	98,6	4,5518	103,2	13,1274	107,8	37,8599
84,9	0,1942	89,5	0,5600	94,1	1,6150	98,7	4,6578	103,3	13,4332	107,9	38,7418
85	0,1987	89,6	0,5730	94,2	1,6526	98,8	4,7663	103,4	13,7461	108,0	39,6442
85,1	0,2033	89,7	0,5864	94,3	1,6911	98,9	4,8773	103,5	14,0663	108,1	40,5677
85,2	0,2081	89,8	0,6000	94,4	1,7305	99	4,9909	103,6	14,3939	108,2	41,5126
85,3	0,2129	89,9	0,6140	94,5	1,7708	99,1	5,1072	103,7	14,7292	108,3	42,4795
85,4	0,2179	90	0,6283	94,6	1,8121	99,2	5,2261	103,8	15,0723	108,4	43,4690
85,5	0,2229	90,1	0,6430	94,7	1,8543	99,3	5,3479	103,9	15,4234	108,5	44,4815
85,6	0,2281	90,2	0,6579	94,8	1,8975	99,4	5,4724	104	15,7826	108,6	45,5177
85,7	0,2334	90,3	0,6733	94,9	1,9417	99,5	5,5999	104,1	16,1503	108,7	46,5779
85,8	0,2389	90,4	0,6889	95	1,9869	99,6	5,7303	104,2	16,5265	108,8	47,6628
85,9	0,2444	90,5	0,7050	95,1	2,0332	99,7	5,8638	104,3	16,9114	108,9	48,7730
86	0,2501	90,6	0,7214	95,2	2,0806	99,8	6,0004	104,4	17,3053	109,0	49,9091
86,1	0,2560	90,7	0,7382	95,3	2,1290	99,9	6,1402	104,5	17,7084	109,1	51,0716
86,2	0,2619	90,8	0,7554	95,4	2,1786	100	6,2832	104,6	18,1209	109,2	52,2613
86,3	0,2680	90,9	0,7730	95,5	2,2294	100,1	6,4295	104,7	18,5430	109,3	53,4786
86,4	0,2743	91	0,7910	95,6	2,2813	100,2	6,5793	104,8	18,9749	109,4	54,7243
86,5	0,2807	91,1	0,8094	95,7	2,3344	100,3	6,7326	104,9	19,4169	112,1	100
dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %	dB SPL	N ₀ %

Para obter o SPL de falantes com eficiências diferentes de 100 %, basta adicionarmos, ao valor anterior, $10 \cdot \text{Log}(\eta_o)$, que sempre negativa, irá reduzir a eficiência de 100 % para o seu valor real:

$$\text{SPL}_{(1W @ 1m)} = \text{SPL}_{(100\%, 1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}(\eta_o) = 112 + 10 \cdot \text{Log}(\eta_o)$$

Para outros valores de potência aplicada, diferentes de 1 Watt, basta somar à expressão acima o nível do SPL produzido pela potência elétrica aplicada, dado por $10 \cdot \text{Log}(P_E)$:

$$\text{SPL}_{(P_E @ 1m)} = 112 + 10 \cdot \text{Log}(\eta_o) + 10 \cdot \text{Log}(P_E)$$

$$\text{SPL}_{(P_E @ r m)} = 112 + 10 \cdot \text{Log}(\eta_o) + 10 \cdot \text{Log}(P_E) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

Distâncias diferentes de 1 m devem ser corrigidas subtraindo-se $20 \cdot \text{Log}(r)$, sendo r a distancia da caixa ao ponto de medição, em metros, supondo uma propagação esférica, em meio espaço.

Para 1 W e 1 m, teremos a sensibilidade de referência, 1/2 espaço: $\text{SPL}_{(P_E @ r m)} = 112 + 10 \cdot \text{Log}(\eta_o)$, onde:

112 dB = SPL em meio espaço, de uma fonte pontual, com 100 % de eficiência ($\eta_o = 1$).

η_o = eficiência de referência, em meio espaço.

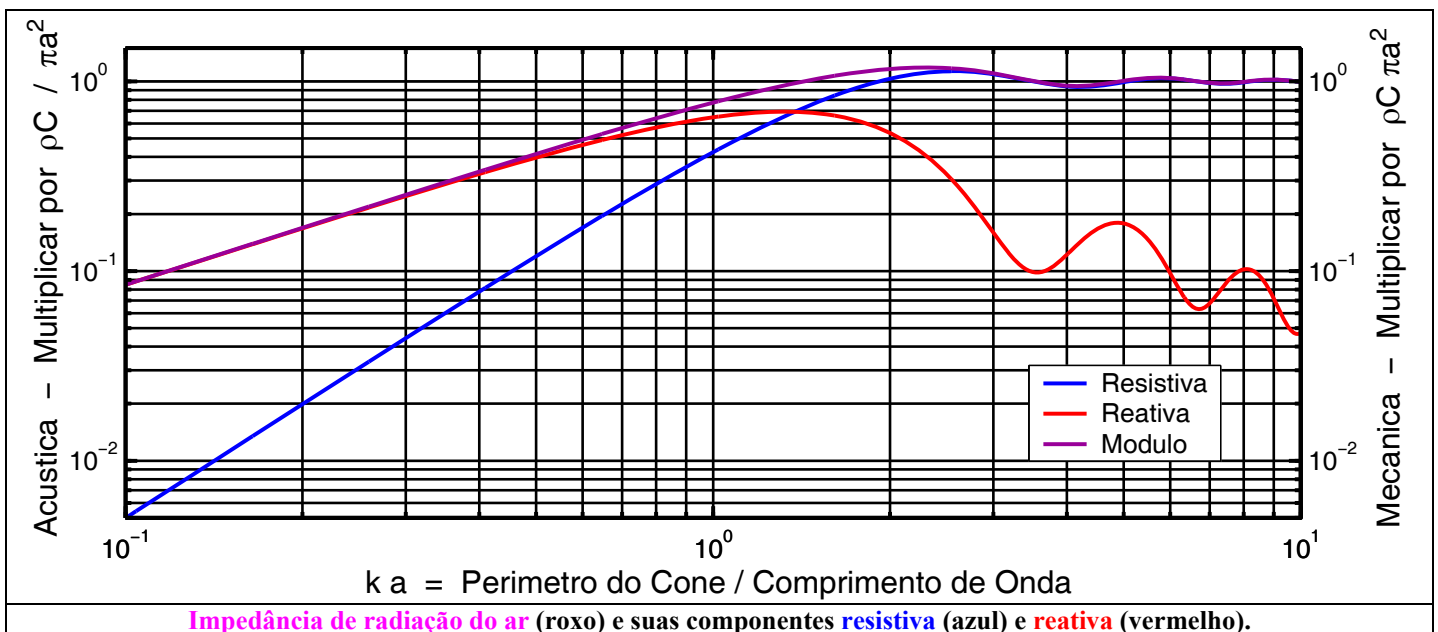
P_E = Potência elétrica aplicada em Watts. ; r = distância de medição, em metros.

• Impedância do Ar e Eficiência

A baixa eficiência dos alto-falantes deve-se à impedância de radiação do ar, composta por um circuito série formado por uma indutância e uma resistência, conforme a figura abaixo, para um falante montado em *baffle infinito*.

O produto ρC (densidade do ar vezes velocidade do som), é a impedância característica do ar, Z_o , e $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ é o número de onda (*wave number*) e λ o comprimento de onda do sinal.

Como a é o raio do cone, $k \cdot a = 2 \cdot \pi \cdot a / \lambda$ é uma quantidade adimensional, igual ao perímetro do cone dividido pelo comprimento de onda, que se constitui em uma forma muito prática de expressar quantidades acústicas.



Como podemos ver, 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 :

$ka > 1$ - Comportamento predominantemente resistivo.

a) Nas altas frequências, quando o perímetro do pistão torna-se maior que o comprimento de onda;

b) Nas baixas frequências com um pistão de dimensões maiores que o comprimento de onda.

$ka < 1$ - Comportamento predominantemente reativo.

Nas baixas frequências com um pistão de dimensões menores que o comprimento de onda.

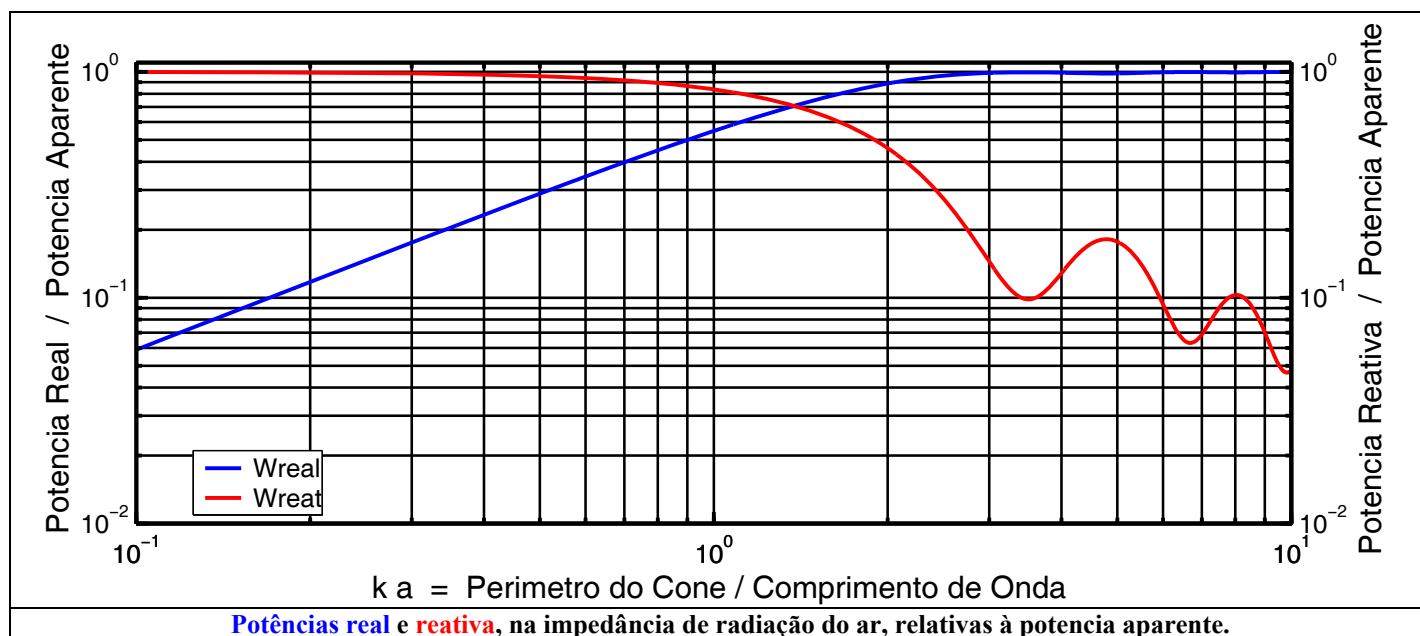
O caso $ka > 1$ é o que geralmente ocorre com os alto-falantes individualmente.

O segundo, $ka > 1$, pode acontecer no empilhamento de grande quantidade de caixas, em um PA. 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 real**, desejada, dissipada na componente resistiva, torna-se muito pequena em relação à **componente reativa**, onde temos uma **potência reativa**, que não contribui para sensibilizar nossos ouvidos, pois seu valor médio é nulo.

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, pois predomina a **potência real**.



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 ($ka > 1$), o que geralmente nunca acontece com um único transdutor, mas pode ocorrer para um agrupamento deles.

• Deslocamento do Cone e Pressão Acústica

A **pressão acústica** produzida por um alto-falante é função da **aceleração do cone**.

Como **aceleração** é a **variação da velocidade** em relação ao tempo, ou seja, a **derivada da velocidade**, que, por sua vez é igual à **derivada segunda do espaço**, podemos obter as relações abaixo, onde Pr é a pressão acústica em Pascal, A é a aceleração em m/s^2 , V a velocidade do cone em m/s e X o deslocamento do cone em metros:

$$Pr_{(\omega)} = \frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot A_{(\omega)} = \frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot \omega \cdot V_{(\omega)} = -\frac{\rho \cdot Sd}{2\pi} \cdot \omega^2 X_{(\omega)} = -\frac{\rho}{2\pi} \cdot \omega^2 \cdot Sd \cdot X_{(\omega)}$$

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

Os sinais negativos indicam uma rotação de fase de 180 graus. Podemos, então, afirmar que a pressão acústica produzida por um falante é diretamente proporcional à aceleração do cone.

Expressando a pressão acústica, produzida pelo falante, em função do deslocamento do cone

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

vemos que, 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 S_d , a área do cone, permanece constante.

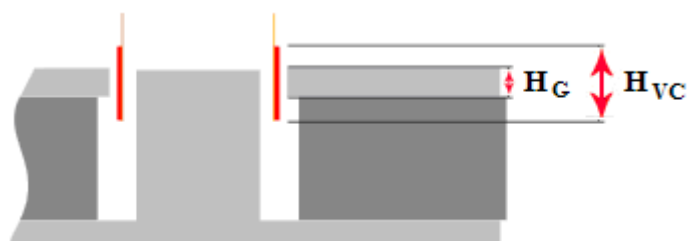
Fica evidente que a utilização de falantes com *diâmetros elevados* é muito conveniente nas baixas frequências, pois isso vai poupar o cone da necessidade de efetuar grandes deslocamentos. Já nas frequências mais elevadas o deslocamento do cone será muito pequeno.

A Pressão Acústica é Diretamente Proporcional à:	
Aceleração do cone.	Densidade do ar.
Volume de ar deslocado, $S_d \cdot X_{(s)}$	Em um dia frio e seco, ao nível do mar (alta pressão atmosférica), teremos maior SPL.
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.

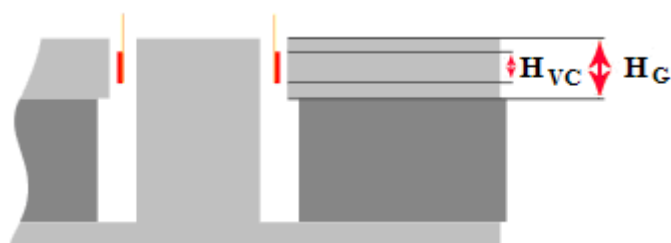
• Deslocamento Máximo X_{MAX}

O deslocamento máximo da bobina, denominado X_{MAX} , representa a região em que a bobina se desloca em um campo magnético constante, ou seja, sem variações.

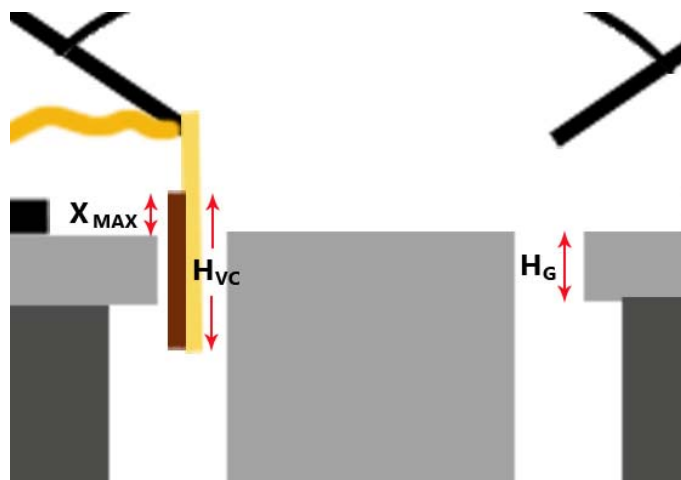
De acordo com a geometria da bobina pode ser calculado conforme a figura abaixo:



Bobina longa (overhung): $X_{MAX} = (H_{VC} - H_G) / 2$.

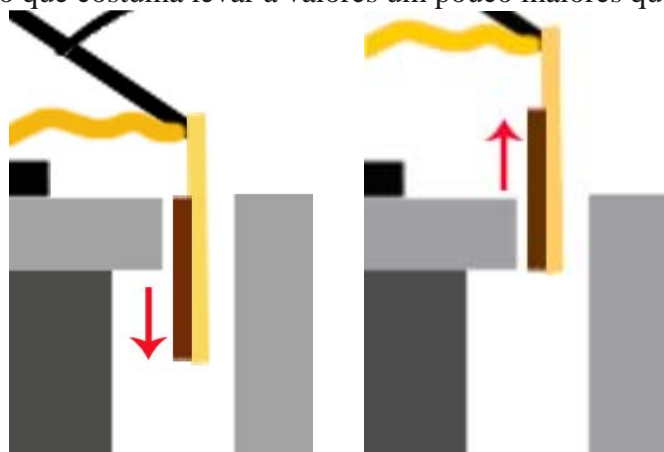


Bobina curta (underhung): $X_{MAX} = (H_G - H_{VC}) / 2$.

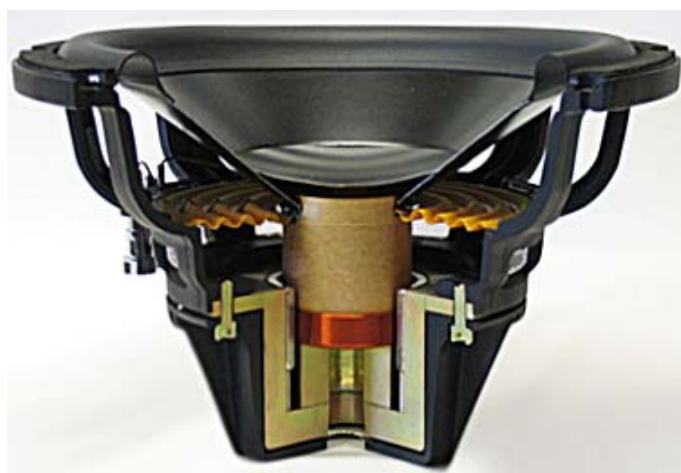


Deslocamento máximo linear X_{MAX} em bobina longa.

Outra maneira de obter o valor de X_{MAX} é relacionar este deslocamento com uma distorção de 10 %, o que costuma levar a valores um pouco maiores que os obtidos geometricamente.



Deslocamento máximo linear X_{MAX} .
Para dentro. Para fora.
Bobina do tipo longa (overhung).

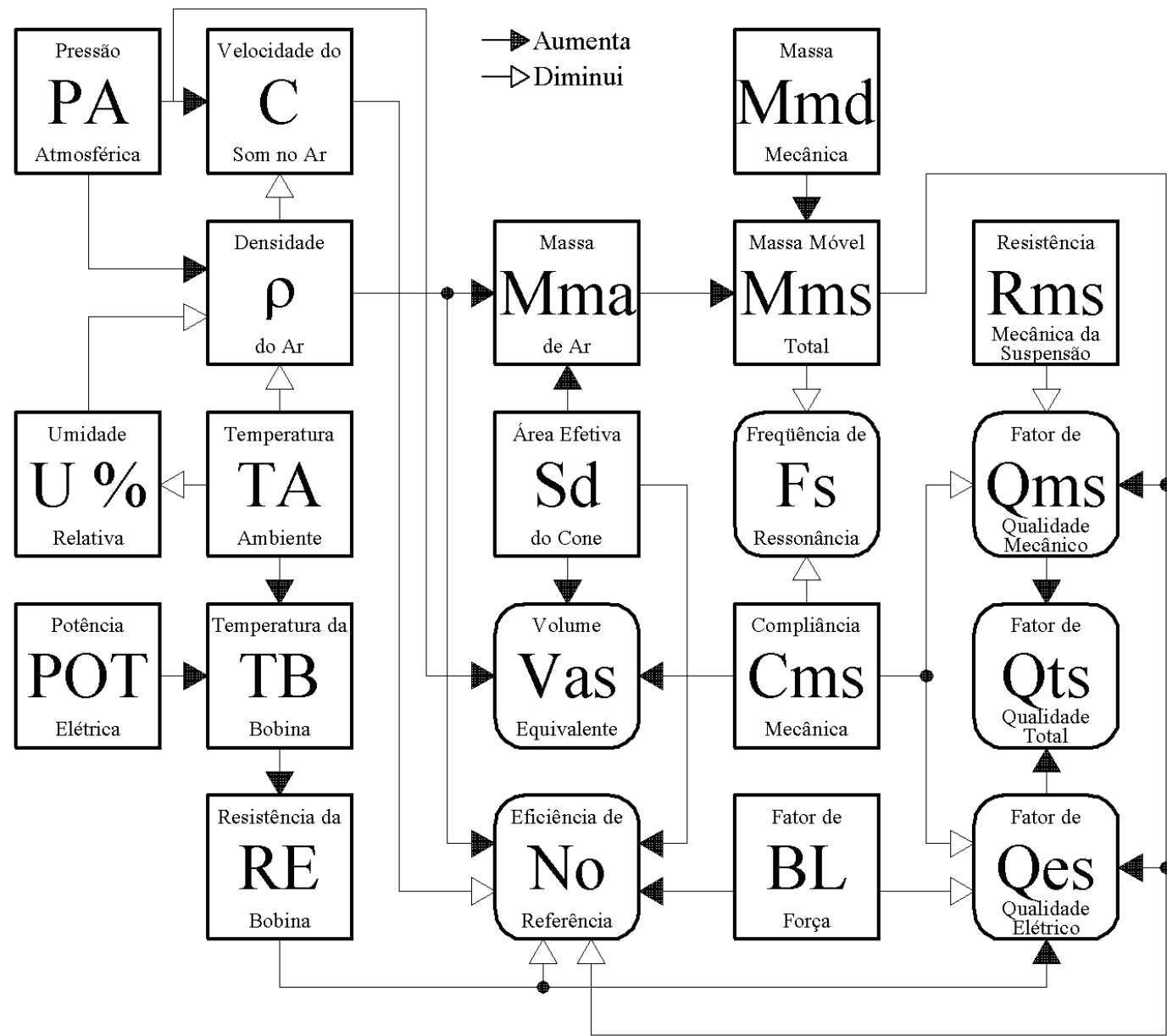


Vista em corte de falante de neodímio.

• Deslocamento Limite X_{LIM}

É o deslocamento máximo absoluto, a partir do qual o falante é danificado pela colisão da bobina com a arruela inferior, pela ruptura ou descolamento da aranha, ou do anel da suspensão. As figuras acima permitem a avaliação desses aspectos.

PARÂMETROS DO ALTO-FALANTE



Como os parâmetros do alto-falante interagem entre si.

4 – Parâmetros Tradicionais São fornecidos outros parâmetros, anteriores aos de Thiele-Small.

•	β	Densidade de fluxo magnético no gap	1,14	Tesla
•	$\beta \cdot L$	Fator de força	17,0	T · m
•	Db	Diâmetro da bobina móvel	75	mm
•	Cf	Comprimento do fio da bobina móvel	26,0	m
•	α_{25}	Coeficiente de temperatura do fio da bobina a 25° C	0,00368	1 / °C
•	T_{MAX}	Temperatura máxima suportada pela bobina	240	°C

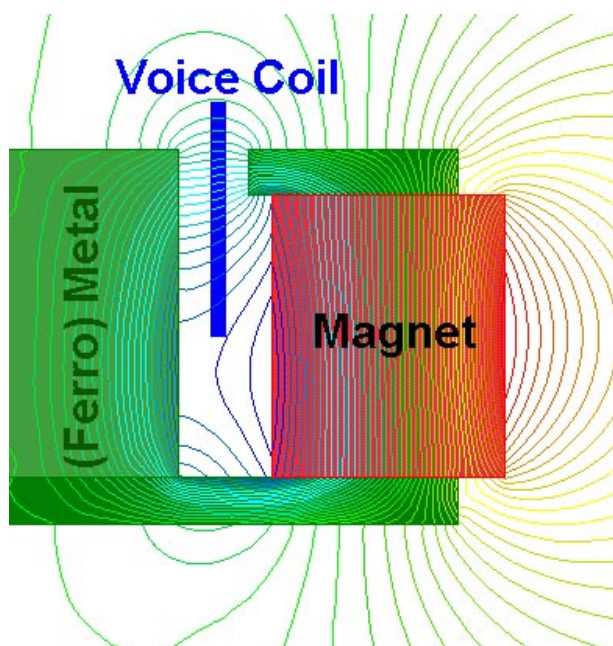
• θ_{VC}	Temperatura máxima da bobina / Potência Máxima	0,69	°C / W
• R_E	Resistência Ôhmica da bobina	5,5	Ohms
• R_{ms}	Resistência mecânica da suspensão	1,3	Kg / s
• M_{ms}	Massa do conjunto móvel	84,6	g
• C_{ms}	Compliância mecânica da suspensão	183,9	μm / N
• H_{ag}	Altura do gap	8,0	mm
• H_{vc}	Altura do enrolamento da bobina	19,5	mm

Comentários aos Parâmetros Tradicionais

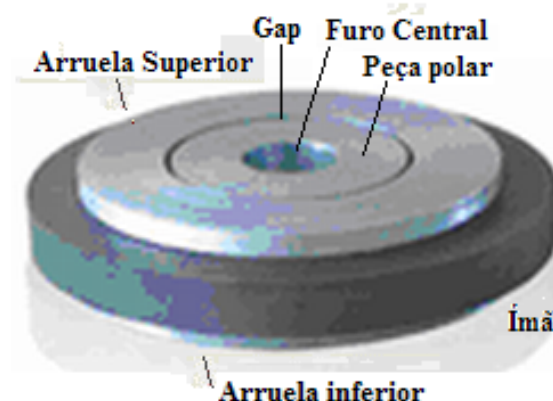
• Densidade de fluxo magnético no gap β

A densidade de fluxo magnético no gap é o cociente entre o fluxo magnético e a área em que ele se distribui. Este fluxo é mais uniforme no gap, ou seja, entre as peças polares. Fora do gap a densidade do fluxo varia.

Fluxo magnético	Densidade de Fluxo Magnético
Weber = $Wb = \frac{Kg \cdot m^2}{s^2 \cdot A}$	Tesla = $\frac{Wb}{m^2} = \frac{Kg}{s^2 \cdot A} = \beta$
$\beta \cdot L \cdot I = \frac{Kg}{s^2 \cdot A} \cdot m \cdot A = Kg \cdot \frac{m}{s^2} = \text{Newton}$	



Distribuição do campo magnético em um alto-falante.
Vista em corte de metade do conjunto magnético.



Conjunto magnético: arruelas inferior e superior, ímã e peça polar, com furo de ventilação central.

• Fator de força $\beta \cdot L$

O *Fator de Força* é dado pelo produto entre a densidade de fluxo magnético no gap, em Tesla, pelo comprimento da bobina, efetivamente enlaçado pelo fluxo, em metros. Esta denominação foi dada em virtude de ser a quantidade que converte a corrente i , circulando pela bobina, na força aplicada ao conjunto móvel. É um dos fatores mais importantes na eficiência do falante e nos valores de Q_{es} e Q_{ts} . Quanto maior o valor de $\beta \cdot L$ maior a eficiência e menores serão Q_{es} e Q_{ts} , conforme vemos abaixo.

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

Fator de Qualidade Elétrico

$$Q_{ts} = \frac{\sqrt{M_{ms} / C_{ms}}}{R_{ms} + \frac{(\beta L)^2}{R_E}}$$

Fator de Qualidade Total

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

Eficiência de Referência

• Diâmetro da bobina Móvel Db

É aproximadamente igual ao diâmetro externo da forma que suporta as espiras da bobina. Como costumam ser utilizadas de uma a quatro camadas, para o dimensional exato devemos levar em conta o diâmetro do fio (incluindo o esmalte isolante) e o número de camadas.

Empiricamente sabe-se que a potência elétrica suportada pelo falante é diretamente proporcional ao diâmetro da bobina móvel.

Um dos materiais mais utilizados para confeccionar a forma da bobina é o Kapton, um polímero desenvolvido pela DuPont, capaz de manter-se estável em temperaturas que vão de -269 a $+400$ graus Celsius. Por esse motivo, substituiu a forma de papel, nos falantes de potência elevada.

A forma de papel continua a ser usada em produtos baratos, ou em falantes para audiófilos, devido ao timbre do papel, considerado superior.

Nos falantes para instrumentos musicais, como guitarra e contrabaixo, embora o papel seja muito utilizado nos modelos *vintage*, é comum o uso de formas de alumínio, cujo timbre é preferido por alguns.



Bobinas de diversos diâmetros.



Falante *vintage*, Celestion, de 20 Watts, com bobina enrolada em forma de papel.

• Comprimento do fio da bobina móvel Cf

Representa o comprimento total do fio usado na bobina, normalmente dezenas de metros.

• Coeficiente de temperatura do fio da bobina α_{25}

O coeficiente de temperatura do fio da bobina, à 25° C, denominado α_{25} , cuja dimensão é 1/°C, pode ser calculado através da equação $\alpha_{25} = \frac{(R_B / R_{25}) - 1}{T_B - T_{25}}$, conhecidas as resistências em duas temperaturas diferentes, sendo uma delas 25° C.

O coeficiente para outras temperaturas pode ser calculado utilizando-se $\alpha_B = \frac{1}{T_B - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}}}$.

O coeficiente de temperatura, a 25° C, do cobre é igual a 0,00385 e o do alumínio 0,00401.

• Temperatura Máxima na Bobina T_{MAX}

A temperatura máxima suportada pela bobina é uma variável importantíssima para a sobrevivência do falante, pois quando ultrapassada normalmente implica em sérios danos ao transdutor.

Devido à baixa eficiência de transdução do falante (3 % típicos para os melhores woofers) não é de espantar a grande quantidade de calor dissipada na bobina, uma vez que apenas uma pequena parte da energia elétrica fornecida é transformada em energia sonora, sendo a maior parte convertida em calor.

Temperaturas superiores a 200 °C são facilmente atingidas nas bobinas de falantes profissionais. Essa situação é combatida através de medidas que propiciem uma melhor dissipação térmica como: peça polar estendida, furo de ventilação central (na peça polar), furos de ventilação no gap e até calota de alumínio.

Alem do risco de dano o aquecimento elevado da bobina provoca a diminuição da eficiência do falante, η_0 , devido à elevação da resistência da bobina, R_E , ao que se denomina *compressão de potência*.

A temperatura da bobina pode ser calculada através da equação: $T_B = T_A + \left(\frac{R_B}{R_A} - 1 \right) \cdot \left(T_A - 25 + \frac{1}{\alpha_{25}} \right)$

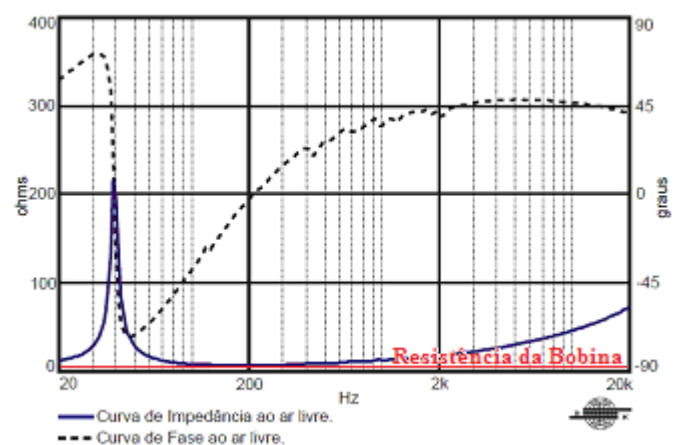
T_B	Temperatura da bobina após certo tempo de funcionamento.	°C
T_A	Temperatura antes de energizar a bobina (geralmente a ambiente).	°C
R_B	Resistência da bobina na temperatura T_B .	Ohms
R_A	Resistência da bobina na temperatura T_A .	Ohms
α_{25}	Coeficiente de temperatura do fio da bobina a 25 °C.	1/°C
	Cobre	0,00385
	Alumínio	0,00401

• Temperatura Máxima da Bobina / Potência Máxima θ_{VC}

O cociente *Temperatura Máxima da Bobina / Potência Máxima*, denominado θ_{VC} , expresso em °C/W, representa a resistência térmica vista pela bobina. No caso deste exemplo 240 W / 350 W = 0,686 °C/W. Quando a troca de calor da bobina com o meio exterior melhora, θ_{VC} diminui.

• Resistência Ôhmica da Bobina R_E

É a resistência elétrica do comprimento do fio, utilizado na bobina móvel do falante, medida em Ohms. Resistência é um tipo de dificuldade à passagem da corrente elétrica que transforma energia elétrica em calor. As reatâncias, que podem



Resistência da bobina móvel igual à 5,5 Ohms.

ser indutivas ou capacitivas, também dificultam a passagem da corrente elétrica, armazenando energia nos campos magnéticos e elétricos, respectivamente, também medidas em Ohms, mas que *não convertem energia elétrica em calor*.

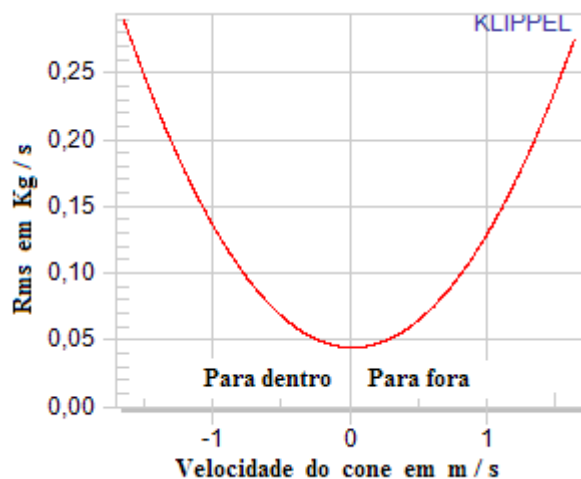
Resistência não deve ser confundida com *impedância*, nem com a *impedância nominal*, embora seja um valor próximo desta última. Resumindo, resistência não varia com a frequência, mas a impedância sim (desde que não seja composta apenas por resistências).

• Resistência Mecânica da Suspensão Rms

A *resistência mecânica da suspensão*, *Rms*, representa as perdas por efeito Joule (calor) na suspensão do falante. Em função da analogia força-tensão é dada pelo cociente força / velocidade, que pode ser desdobrado da seguinte forma:

$$\frac{\text{Kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2}{\text{m} / \text{s}} = \text{Kg} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{Kg}}{\text{s}}, \text{ o que justifica sua unidade, Kg / s. Outra maneira de expressá-la seria: } \frac{\text{N}}{\text{m} / \text{s}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}.$$

O parâmetro *Rms*, tido como linear no cálculo dos parâmetros T-S apresenta não linearidades, como mostra a figura ao lado, onde seu valor aumenta com o módulo da velocidade de deslocamento do cone. Também varia com o próprio deslocamento do cone.



Variação de Rms com a velocidade do cone.

• Massa do Conjunto Móvel Mms

A massa móvel do falante, *Mms*, é igual à soma de duas componentes: *Mmd* + *Mma*, onde *Mmd* é a soma das massas do cone, da bobina, da calota, da aranha e da parte do anel da suspensão que se movimenta, enquanto *Mma* é a massa de ar acoplada ao cone, dada por $\cong 8 \cdot \rho \cdot a^3 / 3$, para $ka < 1$, onde ρ é a densidade do ar e *a* o raio do cone.

$$\text{Mms} = \text{Mmd} + \text{Mma}$$

A equação acima é válida enquanto o falante comportar-se como um pistão rígido, ou seja, até à frequência *Fp*. A partir daí o cone não se move mais como uma peça única, dividindo-se em diversas partes com movimentos independentes.

	Acústica	Mecânica
Massa	Mar [Kg / m ⁴]	Mma [Kg]
Exato	$\frac{Xar}{\omega}$	$\frac{Xma}{\omega} = \frac{Sd^2 \cdot Xar}{\omega}$
ka < 1	$\cong \frac{8 \cdot \rho}{3 \cdot \pi^2 \cdot a}$	$\cong \frac{8 \cdot \rho \cdot a^3}{3}$
Ka > 1	$\cong \frac{2 \cdot \rho \cdot C^2}{\pi^2 \cdot a^3 \cdot \omega^2}$	$\cong \frac{2 \cdot \rho \cdot C^2 \cdot a}{\omega^2}$

Massas Acústica e Mecânica da Impedância de Radiação do Ar, para pistão (falante) ao ar livre.

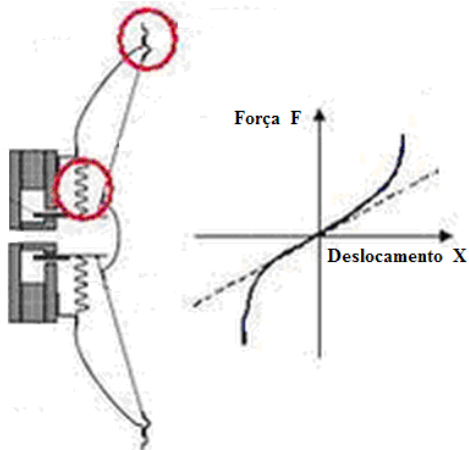
• Compliância Mecânica da Suspensão Cms

A lei de Hooke (ou lei das molas), é dada por $f = K \cdot x$, onde *f* é a força em Newton aplicada na mola, *K* sua elasticidade (ou *elastância*) e *x* o deslocamento produzido, em metros. Como $K = f / x$, vemos que a *elastância* é expressa em *N / m*, e indica a distensão *x*, sofrida pela mola, quando uma força *f* é aplicada.

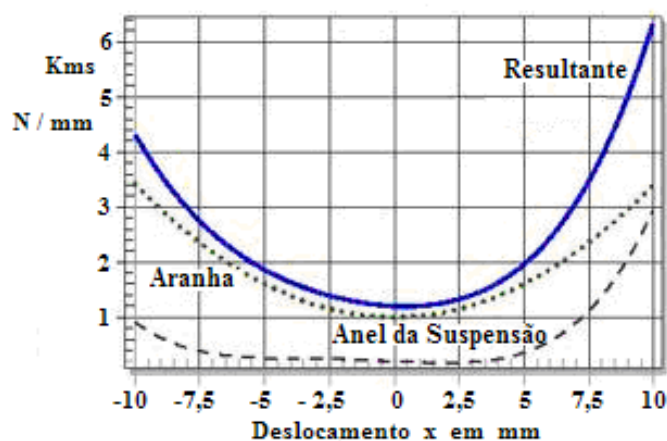
No entanto, no estudo dos alto-falantes costuma-se preferir a utilização do *inverso da elastância*, denominado *compliância*, para exprimir o cociente *deslocamento / força*:

$$Kms = \frac{f}{x} = \frac{N}{m} \Rightarrow Cms = \frac{1}{Kms} = \frac{m}{N}$$

Onde **m** significa mecânico e **s** *speaker* (falante). Assim, *Cms* é a compliância mecânica do falante (ou da suspensão) e *Kms* a elastância mecânica do falante (ou da suspensão).



O efeito de mola da suspensão, e sua linearidade.

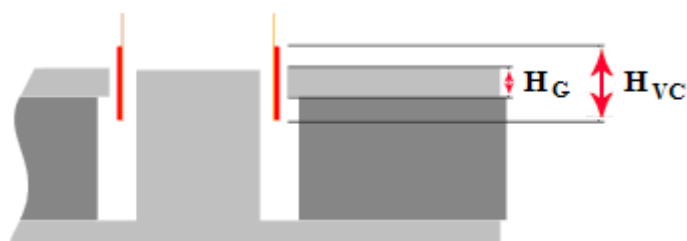


Elastância resultante da suspensão e suas componentes.

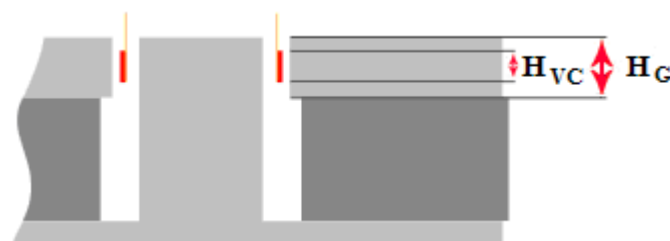
Como a compliância em m / N costuma ser um número muito pequeno é usual exprimi-la em $\mu \cdot \text{m} / \text{N}$.

• Altura do gap H_G e Altura do Enrolamento H_{VC}

Alturas do gap, H_G , e da bobina, H_{VC} .



Bobina tipo “overhung”.



Bobina tipo “underhung”.

A altura do gap corresponde à altura da arruela superior e, nesta região, o campo magnético é uniforme. Por esse motivo convém que a espessura da arruela superior seja maior que a espessura da arruela inferior.

5 – Parâmetros Não Lineares

São fornecidos os parâmetros não lineares da bobina.

Devido ao acoplamento com a ferragem do conjunto magnético, a bobina dos alto-falantes eletrodinâmicos exibe um comportamento não-linear que pode ser modelado através dos parâmetros K_{rm} , K_{xm} , E_{rm} , E_{xm} , que permitem calcular o valor da resistência e da indutância da bobina, em função da frequência. Como esses parâmetros variam com a frequência, são ditos *não lineares*.

•	Red @ Fs	Resistência de perdas em Fs	0,34	Ohms
•	Red @ 1 kHz	Resistência de perdas em 1 kHz	4,32	Ohms
•	Red @ 20 kHz	Resistência de perdas em 20 kHz	44,79	Ohms
•	Le @ Fs	Indutância da bobina em Fs	4,612	mH
•	Le @ 1 kHz	Indutância da bobina em 1 kHz	1,303	mH
•	Le @ 20 kHz	Indutância da bobina em 20 kHz	0,404	mH
Coeficientes do Modelo de Wright				
•	K_{rm}	Coeficiente da resistência de perdas	4,69	mOhm
•	K_{xm}	Coeficiente da indutância da bobina	39,66	mH
•	E_{rm}	Expoente da resistência de perdas da bobina	0,781	-
•	E_{xm}	Expoente da indutância da bobina	0,609	-

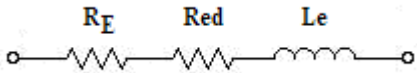
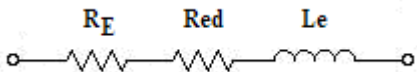
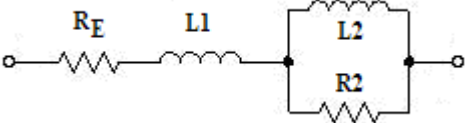
Comentários aos Parâmetros Não Lineares

• Resistência Red

Indutância Le •

Em série com a indutância da bobina, além da resistência R_E , que é linear (a não ser quando submetida a grandes variações de temperatura), temos uma outra, não linear, denominada *Red*, em alusão às correntes de *eddy*, que provocam perdas nas partes de ferro do conjunto magnético. Essas perdas aumentam com a frequência.

Os modelos mais comuns (embora existam outros) estão resumidos abaixo, na nossa ordem de preferência (o de Wright em primeiro lugar e que foi usado no exemplo da ficha técnica).

Modelo	Circuito	Red	Le
Wright		$K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}}$	$K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm}-1)}$
Leach		$K \cdot \omega^n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)$	$K \cdot \omega^{(n-1)} \cdot \text{sen}\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)$
2L R		$\frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{\omega \cdot L_2}\right)^2}$	$L_1 + \frac{L_2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2}\right)^2}$

Resumo dos modelos utilizados para representar as não linearidades da bobina.

Ajuste	Red	Parâmetros Le	XLe	Modulo em Ohms Fase em radianos
Wright	$K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}}$	$K_{xm} \cdot \omega^{(E_{xm}-1)}$	$K_{xm} \cdot \omega^{E_{xm}}$	$ zvc = \sqrt{Red^2 + XLe^2}$ $\theta = \text{tg}^{-1}(XLe / Red)$
Leach	$K \cdot \omega^n \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)$	$K \cdot \omega^{(n-1)} \cdot \text{sen}\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)$	$K \cdot \omega^n \cdot \text{sen}\left(\frac{n \cdot \pi}{2}\right)$	$ zvc = K \cdot \omega^n$ $\theta = \frac{n \cdot \pi}{2}$
2L R	$\frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{\omega \cdot L_2}\right)^2}$	$L_1 + \frac{L_2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2}\right)^2}$	$\omega \cdot L_1 + \frac{\omega \cdot L_2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2}\right)^2}$	$ zvc = \sqrt{Red^2 + XLe^2}$ $\theta = \text{tg}^{-1}(XLe / Red)$

Detalhamento dos resultados apresentados pelos modelos utilizados para representar as não linearidades da bobina.

Os modelos de Wright e Leach são exponenciais e, por conseguinte, não lineares, possuindo a mesma topologia de circuito equivalente, diferindo apenas nas equações para cálculo dos valores dos mesmos. Já o modelo 2L R usa componentes lineares para representar, aproximadamente, os efeitos não lineares, sendo o que apresenta maior erro, mas por vezes é preferido em função da maior simplicidade.

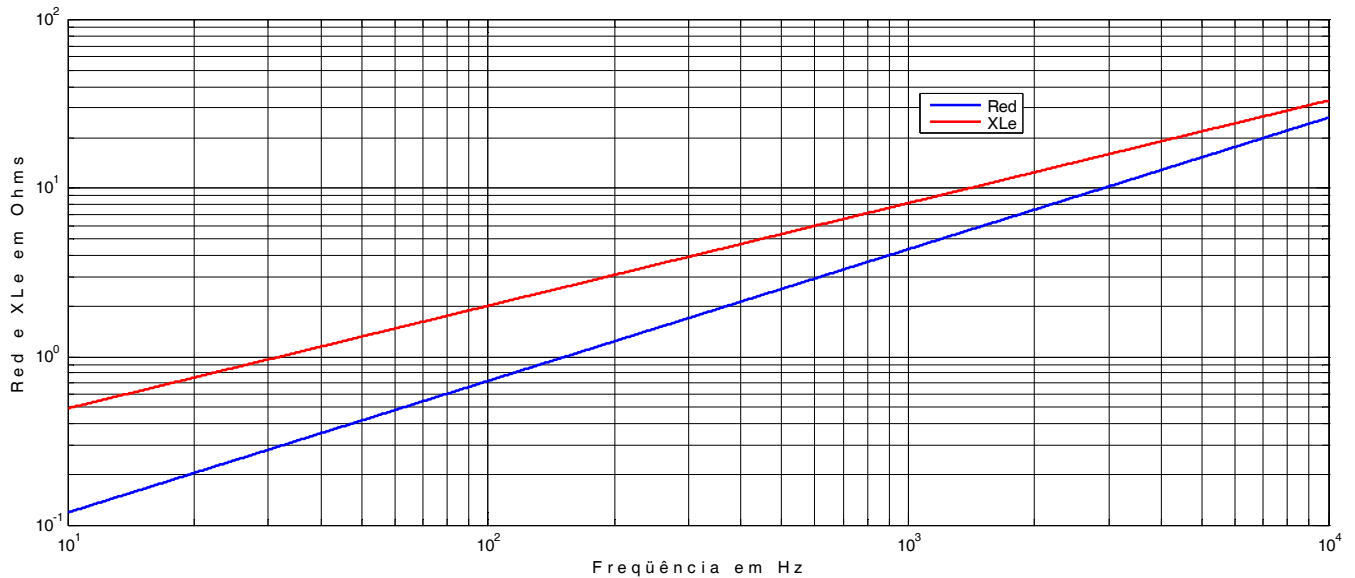
O método 2L R consiste em duas bobinas, associadas em série, com um resistor em paralelo com a segunda e, dessa forma, simula os valores de Le e Red.

Desse modo a indutância Le é composta por duas bobinas em série, sendo a primeira constante, enquanto que a segunda varia com a frequência. Devemos ressaltar que tanto L_1 como L_2 são indutâncias lineares, invariantes com a frequência, mas a resultante Le depende da frequência, efeito conseguido com o resistor ligado em paralelo.

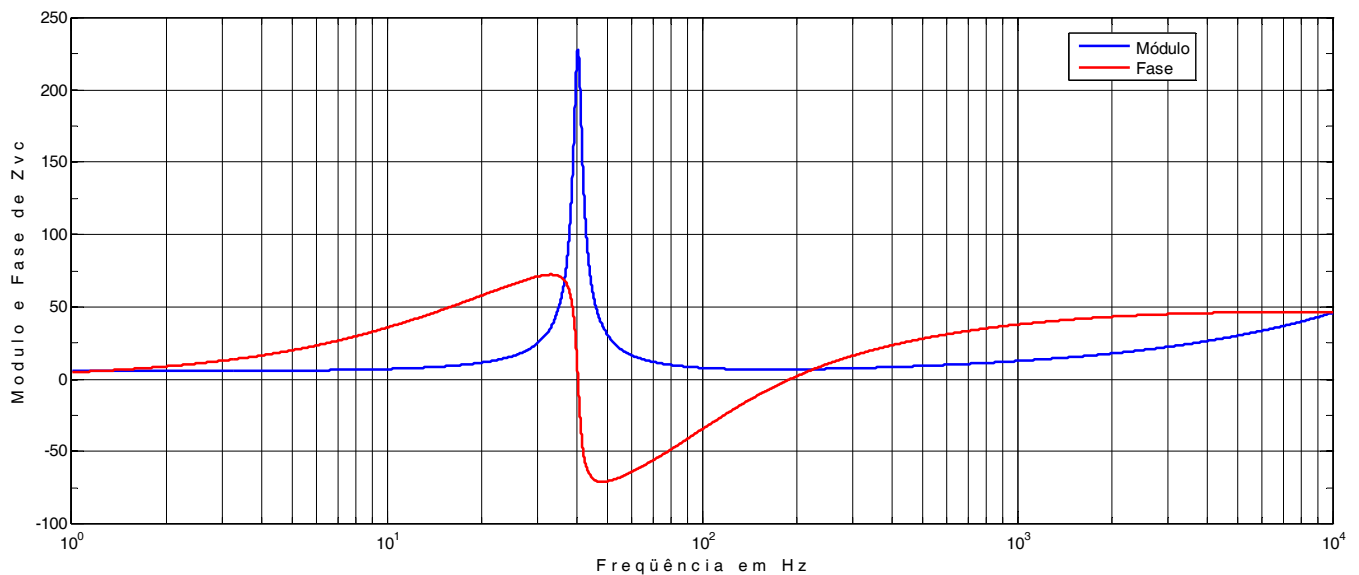
$$j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{R_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2} = j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{R_2 \cdot j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot (R_2 - j \cdot \omega \cdot L_2)}{(R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) \cdot (R_2 - j \cdot \omega \cdot L_2)}$$

$$j \cdot \omega \cdot L_1 + j \cdot \omega \cdot \frac{R_2^2 \cdot L_2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} + \frac{R_2 \cdot \omega^2 \cdot L_2^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \therefore j \cdot \omega \cdot \left[L_1 + \frac{L_2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2} \right)^2} \right] + \frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{\omega \cdot L_2} \right)^2}$$

$$Le = L_1 + \frac{L_2}{1 + \left(\frac{\omega \cdot L_2}{R_2} \right)^2} \quad ; \quad Red = \frac{R_2}{1 + \left(\frac{R_2}{\omega \cdot L_2} \right)^2}$$



Componentes não lineares Red e XLe, em Ohms, obtidas pelo método de Wright.



Módulo em Ohms e fase em graus da impedância da bobina móvel, com as componentes lineares e não lineares.

• Red @ Fs		$4,69 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 40)^{0,781}$	0,35	
• Red @ 1 kHz	$K_{rm} \cdot \omega^{E_{rm}}$	$4,69 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^3)^{0,781}$	4,34	Ohms
• Red @ 20 kHz		$4,69 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4)^{0,781}$	45,0	
• Le @ Fs		$39,66 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 40)^{0,609}$	4,60	
• Le @ 1 kHz	$K_{xm} \cdot \omega^{E_{xm}}$	$39,66 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^3)^{0,609}$	1,30	mH
• Le @ 20 kHz		$39,66 \cdot (2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 10^4)^{0,609}$	0,40	

Semi Indutor

O conceito de *semi indutância* explica perfeitamente o motivo do ângulo de fase da impedância elétrica de um falante tender para 45 graus, nas altas frequências (metade de 90 graus, a fase produzida por uma indutância). Nessa região a impedância da bobina é dada por $R_E + R_{ed} + j \cdot \omega \cdot L_e$, onde tanto a resistência R_{ed} quanto a indutância L_e são não lineares e o cociente $\omega \cdot L_e / (R_E + R_{ed})$ tende para 1, que corresponde ao ângulo de fase de 45 graus.

Essa impedância, nativa do lado elétrico, chamada de *blocked impedance*, é facilmente medida desde que o movimento do cone seja bloqueado (ou o ímã esteja desmagnetizado), situação em que a velocidade de deslocamento do cone é nula, o que obriga a força contra eletromotriz, dada por $\beta \cdot L \cdot v$, assumir valor igual a zero. Nessa situação as impedâncias refletidas dos lados mecânico e acústico desaparecem e não interferem na medida da impedância da bobina.

Um semi indutor tem sua impedância em Ohms definida por $\bar{Z} = \sqrt{j \cdot \omega} \cdot K = \sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega} \cdot K$, onde K é a semi indutância, expressa em semi Henry.

Como $\sqrt{j} = \frac{1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$ (conforme comprovado abaixo):

$$\sqrt{j \cdot 2} = 1 + j \quad \therefore (\sqrt{j \cdot 2})^2 = (1 + j)^2 \quad \therefore j \cdot 2 = 1 + j \cdot 2 - 1 = j \cdot 2 \quad \text{vem:}$$

$$\bar{Z} = \sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega} \cdot K = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \sqrt{\omega} \cdot K = \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}} = \sqrt{\omega} \cdot K \angle 45^\circ.$$

A impedância $\sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega} \cdot K$ possui módulo $\sqrt{\omega} \cdot K$ (em Ohms) e ângulo de fase 45° , consequência da igualdade entre a parte real e o módulo da parte imaginária. Já uma indutância L tem reatância $j \cdot \omega \cdot L$ sendo o ângulo de fase dado pelo operador $j = \sqrt{-1}$, que produz um giro de 90° , de modo que

$$\theta_z = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{\omega} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}}}{\sqrt{\omega} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}}} \right) = \text{tg}^{-1}(1) = 45^\circ$$

duas rotações sucessivas nesse valor levam a um ângulo final de 180° , pois $j \cdot j = j^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1$.

Analogamente, \sqrt{j} é o operador que produz um giro de 45° , e duas rotações sucessivas levarão a 90° , já que $\sqrt{j} \cdot \sqrt{j} = j$. Assim, a impedância dada por uma indutância confunde-se com sua reatância, uma vez que a parte real é nula, pois a indutância é um componente não dissipativo (sem perdas).

Além disso, a reatância indutiva é diretamente proporcional à velocidade angular ω , ou seja, à frequência (pois $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$), sendo, então, linear.

O semi indutor possui uma impedância $\sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega} \cdot K$, não linear (devido a $\sqrt{\omega}$), e um ângulo de fase 45° , (dado por \sqrt{j}), que é metade de 90° . Por esses dois motivos (as perdas e o semi ângulo), $\sqrt{\omega} \cdot K$ é a impedância em Ohms de um semi indutor.

Como a parte real de \bar{Z} é dada em Ohms, pesquisemos as unidades componentes da semi indutância K :

$$\left[\sqrt{\omega} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}} \right] = [\Omega] = \left[\sqrt{\frac{\text{rad}}{\text{s}}} \cdot K \right] = \left[\frac{K}{\sqrt{\text{s}}} \right] \quad \therefore [K] = [\Omega] \cdot \sqrt{\text{s}} = [\text{semi Henry}]$$

Já a parte imaginária (também em Ohms), se dividida por ω , vai nos proporcionar uma indutância (não linear) em Henry, de valor L , dada por:

$$L = \frac{\sqrt{\omega \cdot K}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\omega} = \sqrt{\frac{\omega}{\omega^2}} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{\omega}} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{\omega}} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}} \quad \text{em Henry} \quad \therefore \quad K = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\omega} \cdot L$$

Assim teremos $[K] = \left[\frac{H}{\sqrt{s}} \right] = [\text{semi Henry}]$, onde s significa segundo.

Resta demonstrar que os dois resultados encontrados acima para K são equivalentes. Para isso vamos igualar entre si suas expressões:

$$[K] = \frac{H}{\sqrt{s}} \quad ; \quad [K] = [\Omega] \cdot \sqrt{s} \quad \therefore \quad K = \frac{H}{\sqrt{s}} = [\Omega] \cdot \sqrt{s} \quad \therefore \quad \left[\frac{H}{s} \right] = [\Omega]$$

Utilizando a equação fundamental que relaciona a tensão e a corrente em uma indutância, temos:

$$e = L \cdot \frac{di}{dt} \quad \therefore \quad \frac{e}{di} = \frac{L}{dt} \quad \therefore \quad \left[\frac{V}{A} \right] = [\Omega] = \left[\frac{H}{s} \right]$$

Desse modo podemos afirmar que a semi indutância, cuja unidade é denominada semi Henry, pode ser expressa em $\frac{H}{\sqrt{s}}$ ou $[\Omega] \cdot \sqrt{s}$.

Em Resumo, o semi indutor é um componente não linear de impedância $\vec{Z} = \sqrt{j} \cdot \sqrt{\omega} \cdot K$, e módulo $\sqrt{\omega} \cdot K$ (em Ohms), com um ângulo de fase de 45° , que pode ser entendido como a associação de uma resistência não linear $\frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}}$ em serie com uma reatância indutiva $\frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}}$ não linear e expressa em Ohms.

Essas componentes real e reativa podem ser entendidas como a projeção do módulo da impedância $\sqrt{\omega} \cdot K$ nos eixos real e imaginário, obtidas multiplicando-se, respectivamente, o referido módulo por $\cos(45^\circ)$ e $\sin(45^\circ)$, ambos iguais a $\frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} = \frac{2}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

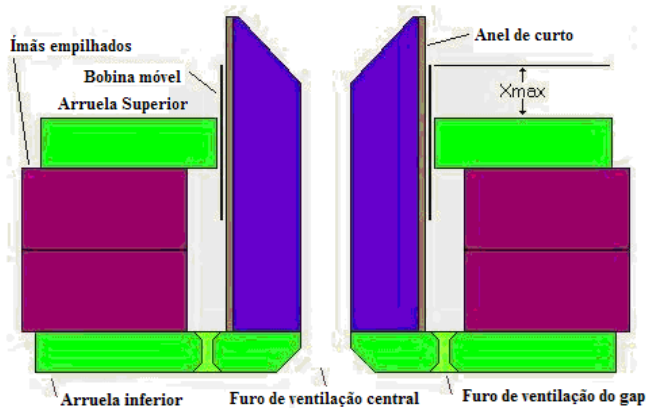
A componente reativa é dada por uma indutância não linear L , igual a $\frac{1}{\sqrt{\omega}} \cdot \frac{K}{\sqrt{2}}$ Henry, onde

$$K = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\omega} \cdot L \quad \text{é a semi indutância, não linear, expressa em } [\text{semi Henry}] = \frac{H}{\sqrt{s}} = [\Omega] \cdot \sqrt{s}.$$

Devido à variação proporcional a $\sqrt{\omega}$, a impedância de uma semi indutância (ou de um semi indutor) varia com uma taxa de 3 dB por oitava, ao invés dos 6 dB por oitava, dos indutores.

$$R_{ed} + j \cdot X_{Le} = R_{ed} + j \cdot \omega \cdot L_e = \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}}$$

$$Z_{VC} = R_E + R_{ed} + j \cdot X_{Le} = R_E + R_{ed} + j \cdot \omega \cdot L_e = R_E + \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{\sqrt{\omega} \cdot K}{\sqrt{2}}$$



Conjunto magnético, com dois ímãs empilhados, para maior X_{max} , anel de curto longo e furos de ventilação.



Arruela inferior, e pino central com anel de curto, para reduzir as componentes não lineares.



Falante cortado de modo a permitir a visualização interna durante o funcionamento.

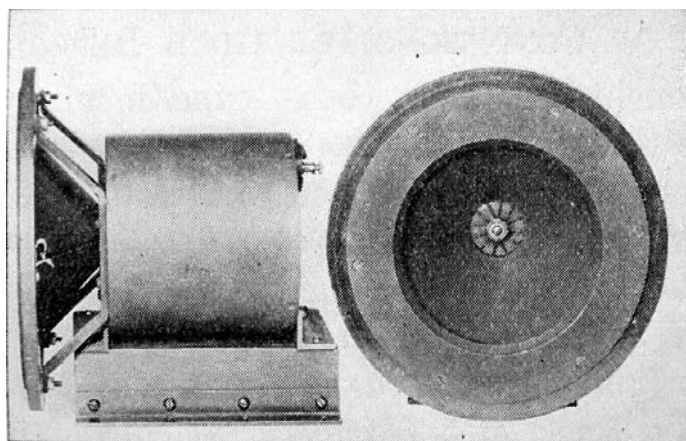
• Material do ímã	Ferrite de bário	-
• Peso do ímã	2,44	mm
• Diâmetro x altura do ímã	200 x 19	Kg
• Peso do conjunto magnético	6,215	-
• Material da carcaça	Chapa de aço	-
• Acabamento da carcaça	Pintura epoxi, na cor preta	-
• Acabamento das arruelas	Cromatização azul	-
• Material do fio da bobina	Cobre	-
• Material da fôrma da bobina	Poliimida (Kapton®)	-
• Material do cone	Celulose de fibras longas	-
• Volume ocupado pelo falante	4,3	litros
• Peso líquido do falante	7,09	Kg
• Peso total (incluindo embalagem)	8,135	Kg
• Dimensões da embalagem (C x L x A)	40 x 39 x 17	cm

Comentários às Informações Adicionais

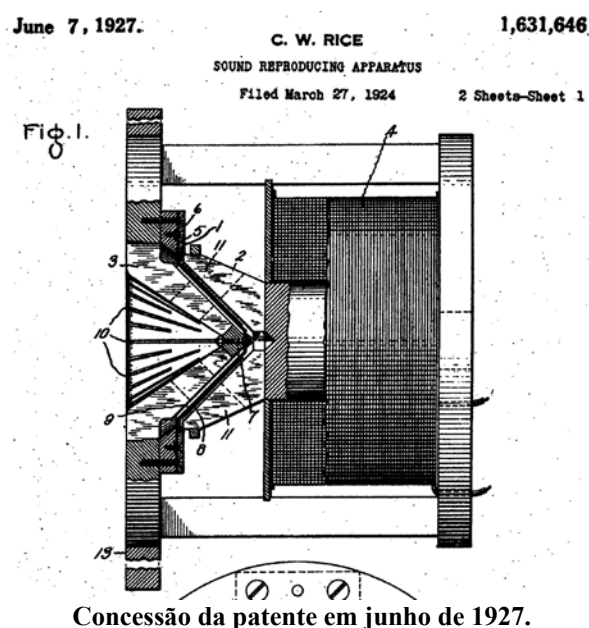
• Material do ímã

Quando o alto-falante eletro dinâmico foi inventado em 1925, por Chester W. Rice e Edward W. Kellog, utilizava um eletro ímã para produzir o campo magnético fixo, devido ao alto custo dos ímãs permanentes na época e à sua pequena disponibilidade. Isso perdurou até o surgimento do **Alnico**, uma liga de alumínio, níquel e cobalto (por vezes inclui cobre e titânio), que começou a ser desenvolvido em 1921, por T. Mishima, no Japão, e foi usado até 1980, nos alto-falantes, ao ser substituído pelos ímãs de **Ferrite** (por razões políticas e econômicas) embora os ímãs de ferrite fossem maiores, mais pesados e possuísem menor intensidade de campo magnético, ou seja, fossem inferiores aos de alnico.

Em 1982 a General Motors e a Sumitomo descobriram o **Neodímio** (uma liga de neodímio, ferro e boro) que superou, em muito, a intensidade de campo dos ímãs de ferrite, permitindo a fabricação de falantes mais leves (um retorno ao desempenho do alnico), e que vem sendo cada vez mais utilizado à medida que seu preço torna-se mais competitivo.



Falante de Rice e Kellog, com eletro ímã.



• **Peso do Ímã**

Os fabricantes costumam fornecer o peso do ímã por duas razões opostas: no caso do ferrite, para mostrar que o ímã é pesado, o que o cliente costumava valorizar; no neodimium, para enfatizar que é leve ... Em ambos os casos, melhor consultar os valores de β , ou $\beta \cdot L$, do que se guiar pelo peso.

No passado não muito distante dentre os poucos parâmetros fornecidos pelos fabricantes lá estava o peso, em onças.

• **Diâmetros e Altura do Imã**

Os anéis de ferrite são encontrados em diversos tamanhos:

Anéis de Ferrite – Dimensões Típicas em mm																	
DE			Diâmetro Externo			DI			Diâmetro Interno			E			Espessura		
DE	DI	E	DE	DI	E	DE	DI	E	DE	DI	E	DE	DI	E			
12,2	4,1	3,8	13	7	2	19	11	2,2	23	10,5	3	25	13	17			
12,4	7	2	16	7	5	20	7	3	27	17	3	27	12,5	5			
14,5	9,3	3,5	17,5	7	3	21	7	5	29	16	5	30	6	4			
32	18	3	45	22	8	53	24	11	72	32	15	121	57	17			
32	18	5	45	22	9	60	24	8	90	36	15	121	57	20			
32	18	6	45	18	8	60	24	12	90	50	15	134	57	17			
32	18	8	45	22	11	60	32	10	90	36	17	155	57	20			
39	22	6	49	28	8	60	32	12	100	57	17	184	60	20			
40	22	8	49	30	8	72	32	10	100	57	20	220	60	20			



Ímãs de ferrite.



Ímãs de Neodímio.



Vintage Alnico

Alnico speakers produce a sweet, warm, vintage tone.

They sound best at low levels and are great for blues, jazz and mellow rock.

Alnico speakers respond quickly, giving the musician a “one with the amp” feel.

They are world renowned as the premium speaker with the best tone.

One of the first speakers ever used in a guitar amplifier was a Jensen® Alnico speaker - the P15N.

The first Fender® Bassman® and Bandmaster® amplifiers were loaded with Jensen® P15N Alnico speakers. In fact, Fender® and other amp manufacturers originally used Alnico speakers exclusively in their amplifiers .

The P10R was the signature speaker in Fender's legendary Super Reverb®.

Alnico speakers are made with magnets containing aluminum, nickel and cobalt. They are often featured in print as “AlNiCo”, symbolizing the three respective elements. Cobalt is difficult to procure these days resulting in Alnicos being the most expensive speakers in the Jensen® line.

All Jensen® Alnico speaker model numbers begin with the letter P, and are therefore often referred to as the P series. Next in the model number is the diameter of the speaker. Alnicos are available in the following diameters: 8”, 10”, 12” and 15”. Following the size is a letter which traditionally is used to designate the speaker power rating. For example, R (25 watts), Q (40 watts) and N (50 watts).

Therefore, a P12Q speaker has an Alnico magnet, a 12” diameter and is rated at 40 watts. After determining what impedance is needed, you are ready to choose your Alnico speaker!

Alnico speakers are available with or without an end bell (purchased separately). The end bell is for aesthetics only and has no effect on the sound of the speaker.



Falante marca *Jensen*, de *AlNiCo*, modelo P12N, de 50 Watts, para guitarra, com som *vintage* e produção atual.



Jensen, P12N, Alnico – 12” p/guitarra.



Jensen, Neodimium – 12” p/guitarra.



Jensen, Ferrite – 12” p/guitarra.

• Peso do Conjunto Magnético

É a soma dos pesos do ímã, das arruelas inferior e superior e do pino central (peça polar).

O projeto do conjunto magnético de um alto-falante é algo bastante complexo, onde nem sempre *mais é melhor* ! As arruelas, por exemplo, não podem ser sub dimensionadas, pois, neste caso, saturariam, estrangulando a passagem do campo magnético, fornecido pelo ímã, que deve ser aproveitado ao máximo. Mas, se forem feitas com altura elevada, e/ou diâmetro muito grande, vão diminuir as linhas de fluxo no gap! Felizmente, hoje, existem softwares de elementos finitos que são de grande auxílio no projeto dos alto-falantes. Dentre estes, não podemos deixar de citar o *Fine Motor*, do dinamarquês *Peter Larsen* que é excelente e completo, principalmente se acompanhado do Fine Cone.

• Material da Carcaça

Geralmente as carcaças dos alto-falantes são produzidas com dois materiais:

• Ferro Estampado (fotos acima)

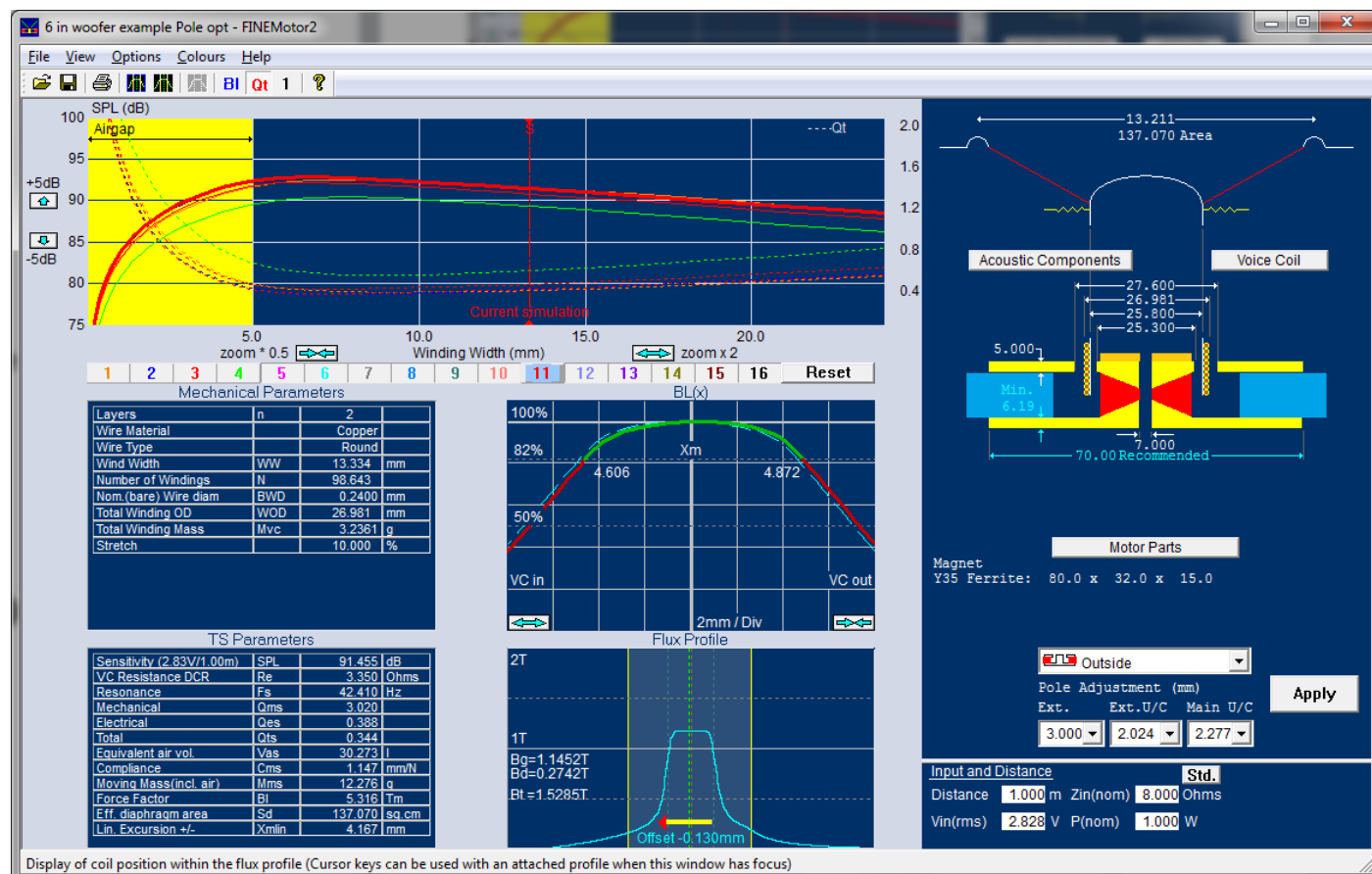
Leve, barato, deforma (pode trancar a bobina), mas não quebra.
Interfere no campo magnético.

• Alumínio Fundido (foto ao lado)

Não se deforma, mas quebra com impacto ou torção.
Não interfere no campo magnético nem enferruja.
Mais pesado e mais caro.



Carcaça de alumínio fundido.



Tela do programa *Fine Motor*, desenvolvido por *Peter Larsen*, da *LoudSoft* para o projeto do conjunto magnético.

<http://www.loudsoft.com/index.php/en/products/design-software/8-indhold/13-finemotor>

• **Acabamento da Carcaça**

Geralmente pintura eletrostática, em epóxi, na cor preta, para maior proteção e melhor visual.

• **Acabamento das arruelas**

Zincagem, cromatização ou bi cromatização, para maior proteção contra oxidação.

• **Material do fio da bobina**

Devido a sua menor densidade o fio de alumínio permite a confecção de bobinas com a terça parte do peso que teria uma similar de cobre. Isso aumenta a eficiência e melhora a resposta aos transientes. *Para uma mesma resistência elétrica o fio de alumínio pesa a metade do que pesaria o fio de cobre.*

No entanto, devido à maior resistividade do alumínio, é necessário um condutor com volume maior que o do cobre para igual condução. Ainda assim o condutor equivalente de alumínio pesa menor.

Uma das maiores desvantagens do fio de alumínio está na grande dificuldade na soldagem do mesmo, o que pode ser solucionado com um revestimento de cobre aplicado no alumínio, o que acontece nos condutores do tipo CCAW (Copper Clad Aluminum Wire).

Como o fio de cobre ocupa um volume menor que o de alumínio permite que mais espiras sejam agrupadas dentro do gap, o que leva a um maior produto $\beta \cdot L$, o que é vantajoso nos subwoofers. Já nos drivers e tweeters o menor peso do alumínio torna-o mais indicado nesses casos.

De um modo geral, as bobinas de cobre são a melhor opção em 95 % dos casos.

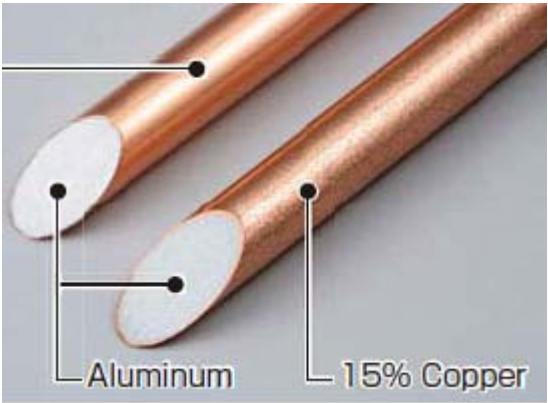
Parâmetros	Unidades	Cobre	Alumínio	CCA10%	CCA15%	HTCCA
% de cobre	%	100	0	10	15	15
Densidade	kg/dm³	8,9	2,7	3,3	3,6	3,6
Condutividade	S*m/mm²	58,5	35,85	37,7	39,2	35,0
Resistividade	Ohm*mm²/m	0,0171	0,0279	0,0265	0,0255	0,0286
Soldagem	-	boa	ruim	boa	boa	boa
Tensão mecânica	N/mm²	220-270	120-140	130-180	170-230	230-280

• **Material da Fôrma da Bobina**

O material usado há mais tempo, e o mais barato de todos, na confecção de formas de bobinas para falantes é o papel.

Para woofers de alta potência podem ser usadas formas de alumínio, Kapton ou fibra de vidro.

Alguns projetistas, no entanto, fazem objeção ao timbre do Kapton e preferem o Nomex, material desenvolvido pela Dupont, comercializado a partir de 1967, que apresenta excelente comportamento termo químico, para um polímero.



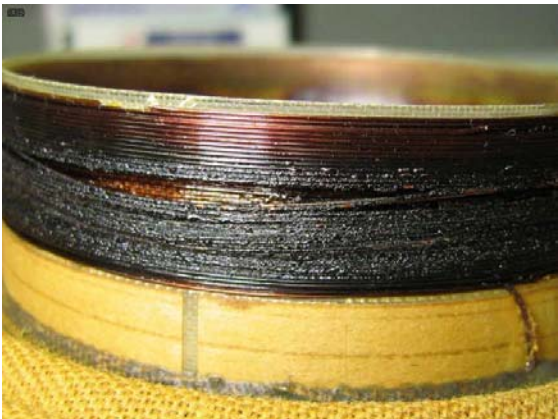
Fio CCAW.



Nomex.



Bobina de duas camadas em forma de 40 mm de alumínio.



Bobina em forma de fibra de vidro, danificada.

• Material do Cone

Os cones de papel (celulose de fibras longas) apresentam uma combinação ideal de peso, rigidez e amortecimento (dado por suas fibras entrelaçadas), o que lhe confere grande estabilidade durante o uso, e por isso representam 85 % dos cones produzidos em todo o mundo, e tidos como possuidores de excelente timbre, sendo usados por fabricantes de renome em todo o mundo, como *Scan-Speak*, *Vifa* e *Peerless*, dentre muitos outros.

Não podemos esquecer que em seu funcionamento o cone de um falante está sujeito a grandes esforços mecânicos. Exemplificando, um cone de 12”, com uma excursão de pico igual a 6 mm, em 60 Hz, está sujeito a uma aceleração de, aproximadamente, 90 vezes a aceleração da gravidade, e força é igual ao produto massa · aceleração...



Exemplos de outros materiais utilizados na fabricação de cones, além da celulose.

Outros materiais também são utilizados na fabricação de cones, conforme o resumo abaixo. Mais informações estão disponíveis em http://www.stonessoundstudio.com.au/stone/diy_speaker_info/diy_driver_types_p3.htm.

• Polipropileno (PP)

Polipropileno é um material muito utilizado em virtude de sua rigidez aceitável, bom amortecimento e total resistência à água. Costumam ser reforçados com mica, talco, carbono, acrílico, fibra de vidro ou Kevlar. Apresentam alguma dificuldade na colagem e devem ser lixados na área de colagem.

• Fibra de Carbono

Considerado possuidor de excelentes qualidades, pode ser usado na forma de composto (para reforçar outro material), na forma de tecido ou cobertura para o papel. Não é um material fácil de ser trabalhado, mas pode produzir excelentes resultados.

• Kevlar

Utilizado em coletes à prova de bala, também é empregado em cones de alto-falantes, moldado, como tecido, sozinho ou como recheio, em cones tipo sanduíche. De modo semelhante aos metais, pois também é leve e rígido, pode produzir um som de sino, embora possua algum amortecimento interno, que atenua o problema sem eliminá-lo. Por esse motivo os fabricantes Scan-speak, Focal, Eton, e Audax o usam na forma de sanduíche, com outros materiais.

• Alumínio

Atraentes por sua rigidez, o que reduz a distorção produzida pelas deformações do cone, apresenta baixo amortecimento interno, o que pode prejudicar o timbre, principalmente em frequências próximas ao break up, o que é usado como efeito em caixas para contra baixo.

Pode ser usado, também, com os devidos cuidados, em sub woofers e woofers.

• Magnésio

Usado pela Seas em sua linha da série Excel, tem comportamento semelhante ao do alumínio, sendo ainda mais leve do que este, tendo rigidez semelhante e ainda menor amortecimento.

• Fibra de Vidro

Utilizada por alguns fabricantes na forma de tecido trançado com suas fibras, ou como reforço para outros materiais. Sua maior desvantagem consiste no peso elevado.

• Volume Ocupado pelo Falante

Consiste no volume de ar ocupado pelo falante, quando instalado na caixa.
Para caixas com volumes inferiores a 50 litros deve ser levado em consideração no cálculo do volume interno útil.

• Peso Líquido do Falante

Indica o peso do falante.

• Peso Total (incluindo embalagem)

O peso do falante em sua embalagem de comercialização.
Importante para a cotação do custo do frete.

• Dimensões da Embalagem (C x L x A)

As medidas externas lineares da embalagem: Comprimento, Largura e Altura.
Importante para a armazenagem do estoque, também entre, às vezes, no cálculo do frete.

7 – Informações Para Montagem

São fornecidas informações referentes à montagem do produto.

• Número de furos de fixação	8	-
• Diâmetro dos furos de fixação	5,5	mm
• Diâmetro do círculo dos furos de fixação	367	mm
• Diâmetro do corte para montagem frontal	352	mm
• Diâmetro do corte para montagem traseira	348	mm
• Tipo do conector	Soldável	-
• Polaridade	Tensão + no (+): deslocamento p/ frente	-
• Distância entre a parede da caixa e a traseira do falante	75	mm

Comentários às Informações para Montagem

• Número de Furos de Fixação

Para os alto-falantes, principalmente os pesados, e/ou com diâmetros de 10” ou mais, o melhor é o fabricante utilizar 8 furos de fixação no chassi.

Isso proporciona melhor distribuição de carga nos parafusos e diminuir as vibrações no painel.

Ao selecionar o falante a ser utilizado o projetista deve observar se os furos estão adequadamente centralizados na borda de fixação, pois podem existir produtos com os furos deslocados para a borda, o que provoca rachaduras na madeira no momento de fixar os parafusos.

• Diâmetro dos Furos de Fixação

Para os alto-falantes, principalmente os pesados, e/ou com diâmetros de 10” ou mais, o melhor é a utilização de buchas de fixação, conhecidas no comércio especializado em ferragens para móveis como *buchas americanas*. Não use parafusos de fenda (a chave escapa e fura o cone) nem auto atarrachante (madeira), pois se for necessário retirar o falante provavelmente não dará mais aperto na recolocação.

O ideal é usar buchas e parafusos de 1/4” (6,35 mm), ou M6 (6 mm).

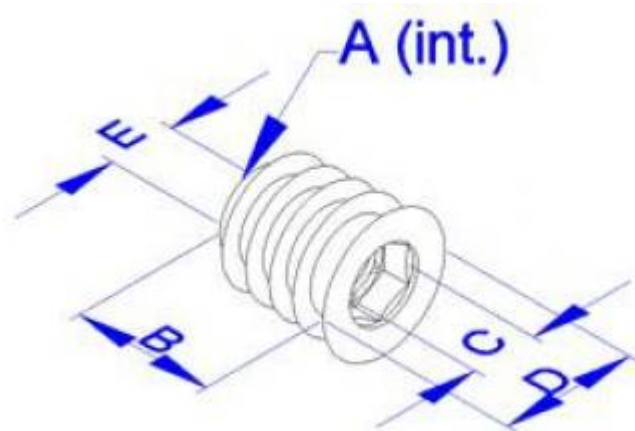
Não aperte o parafuso em uma única operação:

Primeiro “encoste” o parafuso na posição em que, a partir dali, será necessário a aplicação de força.

Daí em diante dê um pequeno aperto nos parafusos, pulando para o que está oposto a ele na sequência (em cruz). Repita até conseguir o aperto adequado, que não pode ser excessivo nem insuficiente. O uso de uma chave de torque é muito recomendado.

<http://www.wind.ind.br/principal.php?pagina=produtoview&idp=76&img=2>

BUCHAS AMERICANAS



BUCHAS AMERICANAS - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Código	Rosca - A	Medidas				
		B	C	D	E	F
203201001	1/4 UNC	13	6	Ø12.5	Ø7.5	Ø9
203201023	M5	13	6	Ø12.5	Ø7.5	Ø9
203201003	M6	13	6	Ø12.5	Ø7.5	Ø9
203201016	5/16 UNC	17	8.2	Ø14.5	Ø10	Ø10.5
203201027	M8	17	8.2	Ø14.5	Ø10	Ø10.5
203201013	5/16 UNC	19.05 (3/4)	8	Ø14.2	Ø9.5	Ø10
203201002	1/4 UNC	20	6	Ø12.2	Ø7.8	Ø9
203201011	M6	20	6	Ø12.2	Ø7.8	Ø9
203201020	1/4 UNC	25	6.35 (1/4)	Ø12	Ø7.6	Ø8
203201025	5/16 UNC	25	8	Ø14.5	Ø9.5	Ø10

Bucha de Zamac



Deficiências

Quebra com facilidade devido ao uso de chave de fenda. Sem aba para travar.

Bucha em aço, com aba



Vantagens

Muito mais resistente, mesmo em Zamac, pois usa chave Allen. Com aba para travar.

Parafuso de cabeça cilíndrica, com sextavado interno

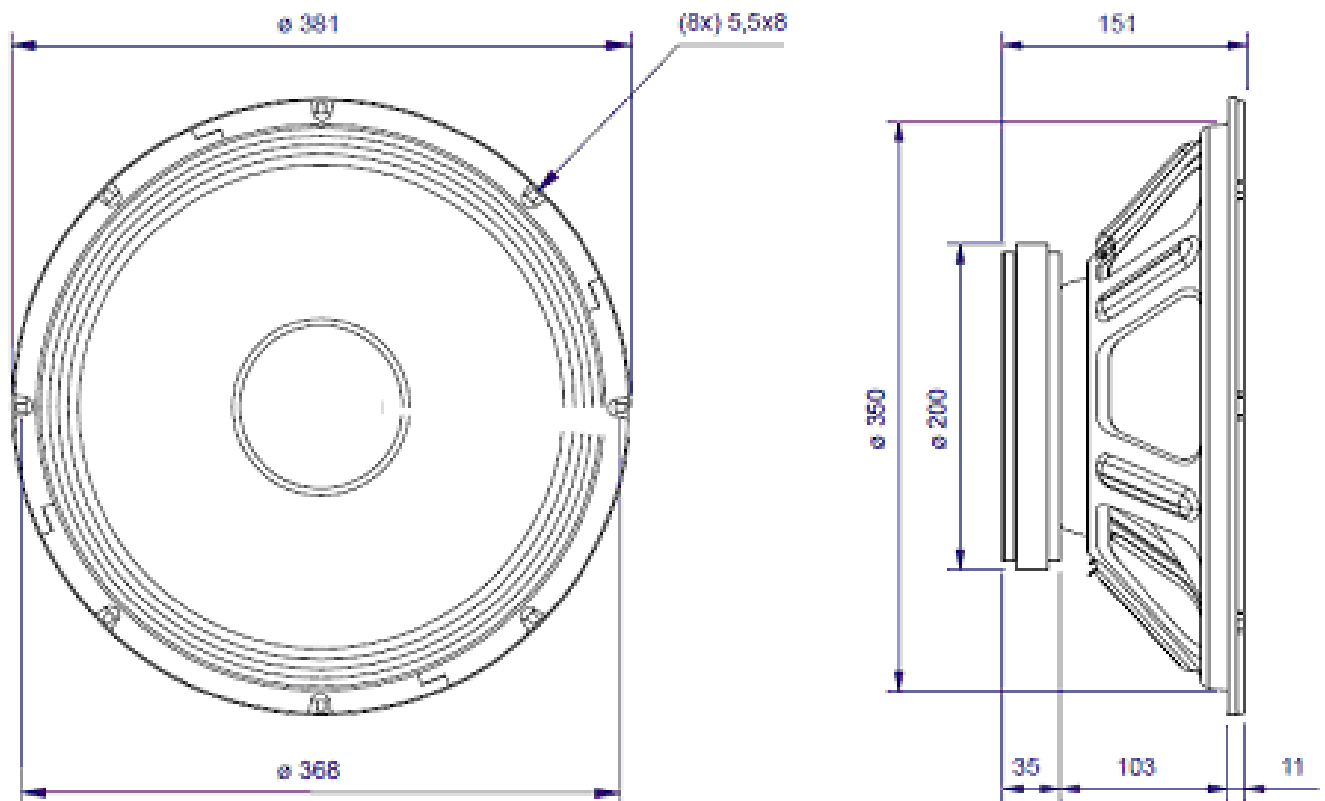


Buchas e parafusos de 1/4" (6,35 mm) ou M6 (6 mm), de cabeça cilíndrica e sextavado interno.

• Diâmetro do Círculo dos Furos de Fixação

Os bons fabricantes fornecem informações detalhadas (e corretas) a respeito das dimensões utilizadas nas diversas furações necessárias à instalação do falante, na caixa.

Note que os furos de fixação para instalação frontal ou traseira são diferentes.



• Montagem Frontal

Os transdutores, de um modo geral, podem ser fixados nos gabinetes (caixas) pela frente ou por trás do painel de fixação, sendo, geralmente, colocados na frente da caixa.

Na montagem frontal não há abertura de visitação, pois o corpo do falante passa pelo furo de fixação, o que simplifica o processo. Esta é a montagem mais utilizada, mas que possui um inconveniente: a maioria dos falantes não possui um anel de guarnição na parte traseira do chasis, o que pode prejudicar a vedação e não contribui para a redução da transmissão de vibrações do falante para a estrutura da caixa.

• Montagem Traseira



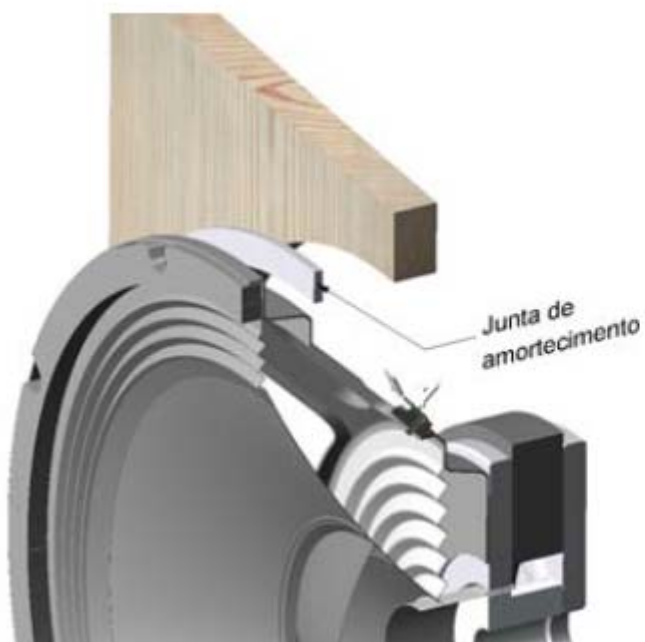
Montagem frontal dos transdutores: sem rebaixo (esquerda) e com rebaixo (direito).



A guarnição (anel de material macio ao redor da borda) normalmente existe apenas no lado da frente.



Exemplos de falantes que, excepcionalmente, possuem guarnição no lado de trás. O da direita é um coaxial.



Montagem frontal.



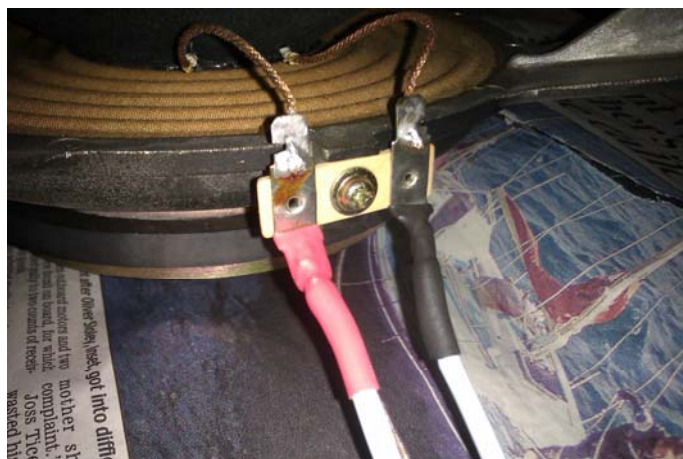
Montagem traseira.



Exemplos de montagem traseira. Na esquerda, chanfro para evitar efeito de duto.

• Tipo do Conector

Os tipos mais comuns de bornes utilizados nos alto-falantes são aqueles para solda, tipo espada, que também aceitam a inserção de conectores, ou os bornes de pressão, que prensam os fios.



Bornes para solda ou encaixe de conectores, comuns em alto-falantes.



Bornes de pressão usados para conectar diretamente os fios no falante.

Já as caixas acústicas, principalmente aquelas para uso profissional, devem ser conectadas aos amplificadores através de conectores adequados, próprios para esta finalidade, onde elevadas correntes estão envolvidas e não podem acontecer vazamentos de ar, através do conector. Para isso a melhor opção consiste no uso de conectores do tipo *SpeakOn*.

NÃO USE conectores P10 ou XLR para essa finalidade.



	FC Cable Connectors	Chassis Connectors	SPX Cable Connectors	STX Cable Connectors	STX Chassis Connectors
Electrical					
Number of contacts	2, 4, 8	2, 4, 8	4	4, 8	4, 8
Rated current per contact	30 A	•	•	•	•
	40 A	-	-	-	-
Isolated Voltage	250 V ac	•	•	•	•
Termination	PCB	-	-	-	•
	FASTON® - Solder	•	•	-	•
	Screw Terminals	•	•	-	-
	Solder Terminals	-	-	•	•
Mounting	Thru holes	-	-	-	•
	Self tapping screw holes (A screw)	-	-	-	•
	Metal M3 thread	-	•	-	-
Shell	Plastic	Plastic	Plastic	Metall	Metall

Conectores SpeakOn, próprios para caixas acústicas.

• Polaridade

A polaridade dos falantes, erradamente chamada de fase, é algo que precisa ser respeitado, principalmente no caso de sistemas que utilizam mais de um transdutor, sob pena de severos cancelamentos na resposta de frequência.

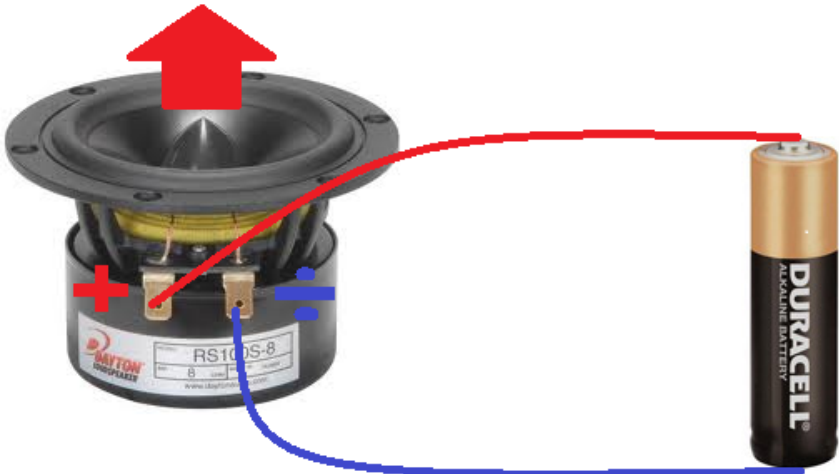
Convencionou-se que uma tensão **positiva**, aplicada no terminal **positivo** da bobina, deve deslocar o cone para **frente** do falante, conforme a figura ao lado.

A polaridade precisa ser verificada antes e depois do transdutor ser instalado na caixa.

Antes, para prevenir contra erro de montagem: o campo magnético pode ter sido invertido devido à troca de fios na imantadeira, durante a manutenção; a bobina móvel ter sido enrolada no sentido contrário, ou pode ter ocorrido uma simples troca de posição entre os bornes vermelho e preto. O teste posterior à montagem garante contra a possibilidade de inversão dos fios de ligação.

Embora o teste com a pilha seja muito simples, fica inviável no caso de drivers e tweeters, ou quando o falante está instalado em caixa corneta ou band pass pois, nesses casos, o falante fica alojado em uma câmara interna.

Essa dificuldade é plenamente solucionada com o uso de um equipamento denominado *Polarity Checker* (erradamente, *Phase Checker*), que gera um pulso positivo de amplo espectro de frequência, capaz de excitar transdutores operando em toda a faixa de áudio. Alguns modelos são vendidos aos pares: um gerador de pulsos e o receptor, indicando este a polaridade do pulso reproduzido pelo transdutor.



Testando a polaridade do falante com pilha.

Verificadores de polaridade para áudio (*Polarity Checker*), impropriamente chamados de (*Phase Checker*).



Gerador e receptor.



Receptor dos pulsos gerados em CD de teste.

Outros usam os pulsos fornecidos por um CD e consistem apenas no receptor.

No primeiro caso (transmissor e receptor) existe a vantagem de permitir que os transdutores sejam testados sem a necessidade de serem ligados a um amplificador. Mas ambos os tipos permitem que o sistema completo (fios, cabos conectores e transdutores), já montado, tenha sua polaridade devidamente verificada, injetando os pulsos em um canal da mesa.

Já houve casos, em grandes eventos, onde PAs de diferentes empresas foram associados, mas estavam com fase invertida, um em relação ao outro, o que provocou cancelamento quase total dos graves: o operador, no house mix, foi elevando o volume, para o sinal “aparecer”, o que provocou a queima dos woofers ...

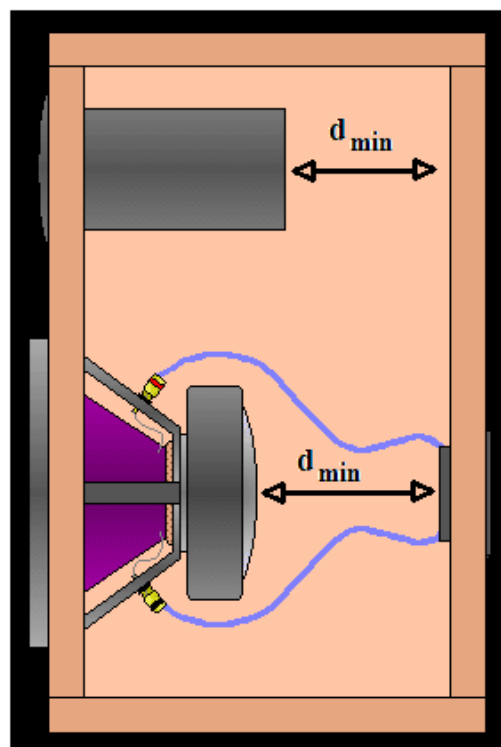
• Distância entre a Parede da Caixa e a Traseira do Falante

Os falantes para potências elevadas possuem furo (ou furos) de ventilação na parte traseira, para facilitar a saída de ar quente da bobina.

Esta circulação de ar não pode ser dificultada por obstáculos como material absorvente, usado na caixa, ou a proximidade excessiva de uma parede ou divisória da caixa (o que também provoca alteração em alguns parâmetros).

Uma distância mínima em torno de 10 cm, aproximadamente, é considerada adequada.

O mesmo critério aplica-se à extremidade dos dutos, em caixas do tipo refletora de graves (*bass reflex*) ou *band pass*.



$$d_{\min} \geq 10 \text{ cm}.$$

Diretividade do Alto - Falante

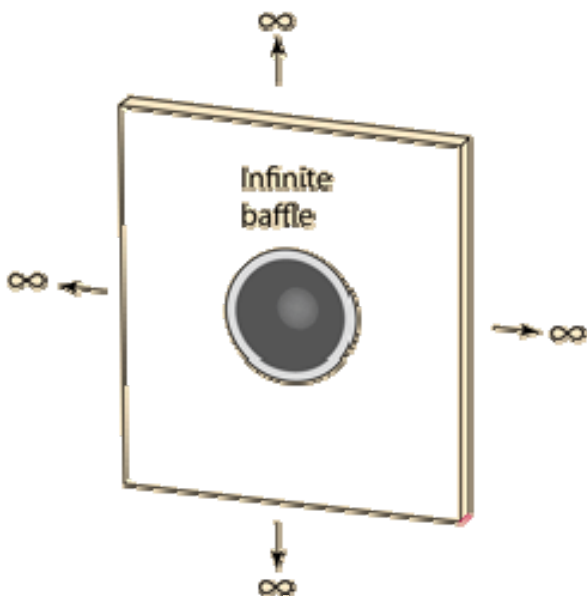
• Baffle Infinito

O valor de ka não apenas influi na eficiência como tem papel importante na diretividade do pistão. Na figura adiante temos os diagramas polares correspondentes a ka variando de 0,5 a 10, onde podemos ver que para $ka < 1$ o pistão é omnidirecional, ou seja, irradia em todas as direções. Isso significa que em uma *caixa acústica*, operando em baixas frequências, teremos o mesmo SPL em qualquer ponto dela equidistante, seja na frente, dos lados ou até atrás.

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 objetivo em alguns casos, a radiação traseira, tão comum nos graves, geralmente é indesejável, pois invade o palco acarretando inúmeros problemas para os músicos e cantores.

Esse inconveniente pode ser reduzido com os sub woofers cardióides, que reduzem a energia irradiada pelo lado de trás da caixa.



Falante em baffle infinito.



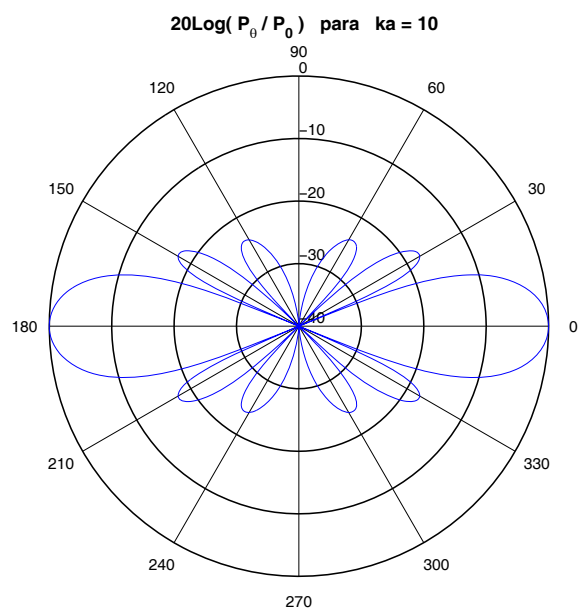
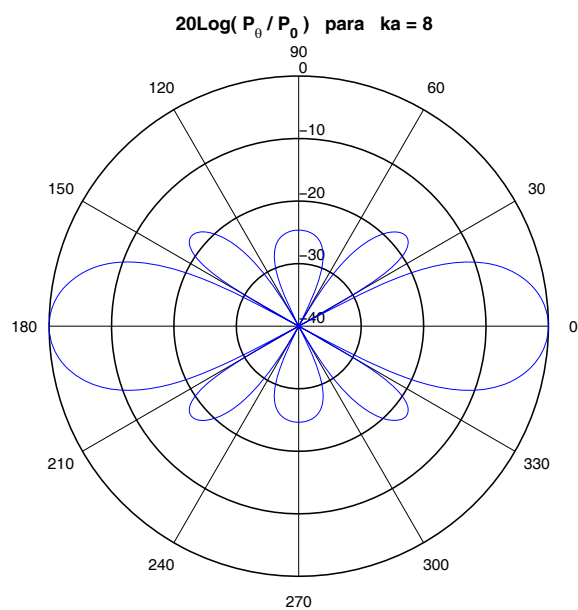
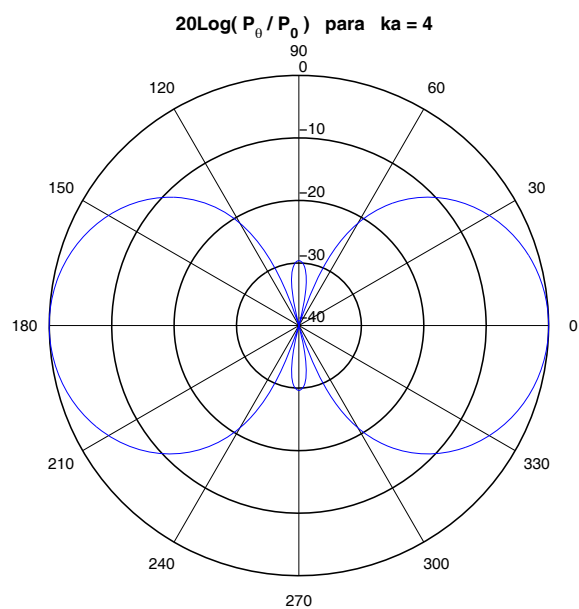
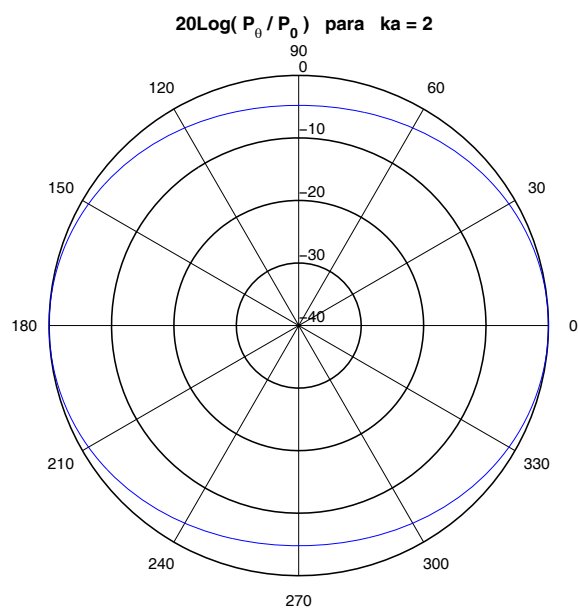
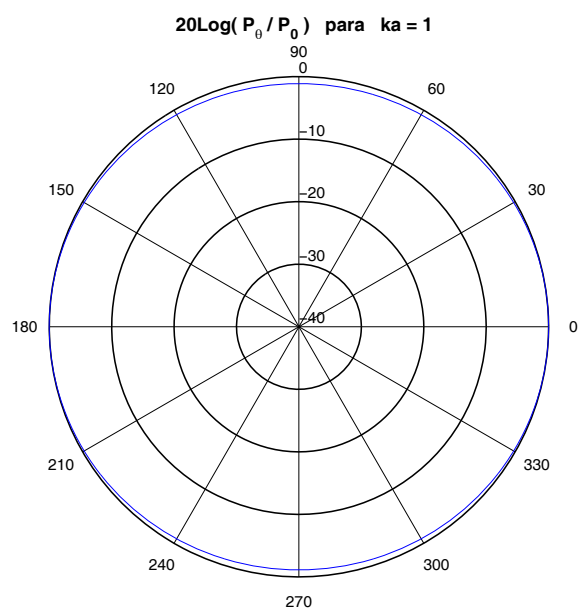
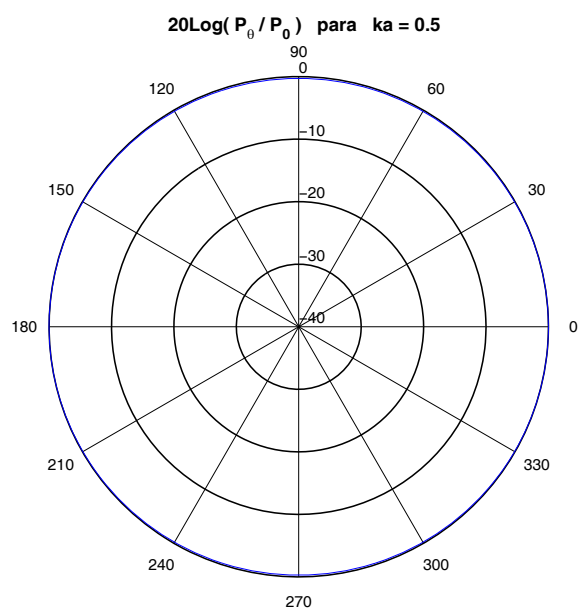
Baffle infinito, projetado pelo Eng. Paulo Fernando Cunha Albuquerque, introdutor da teoria de T-S, no Brasil (1980).

• Ar Livre

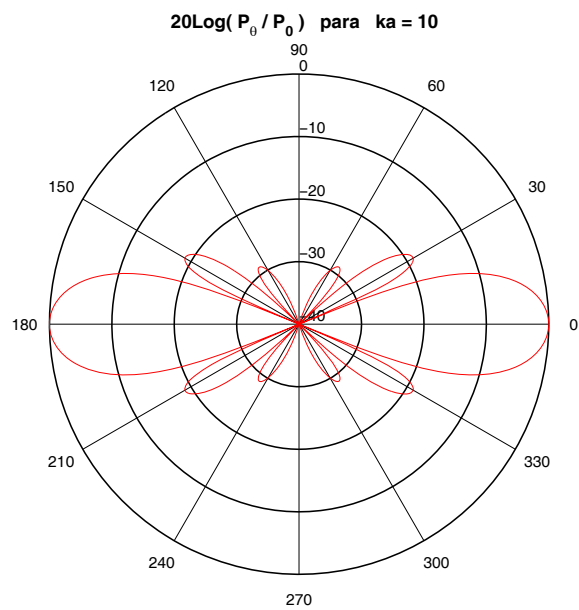
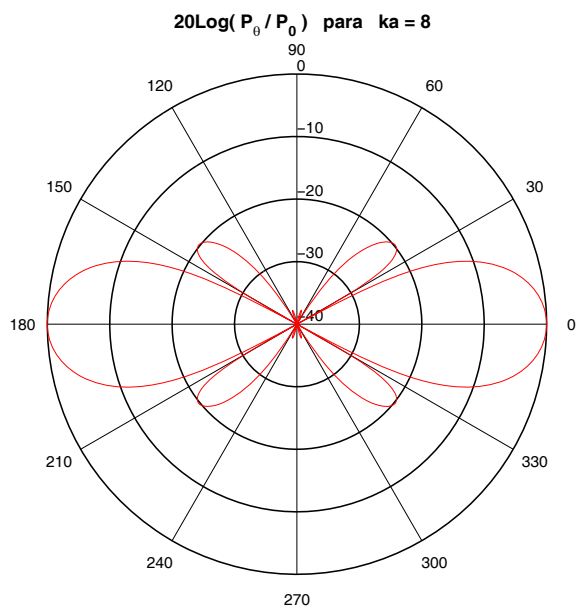
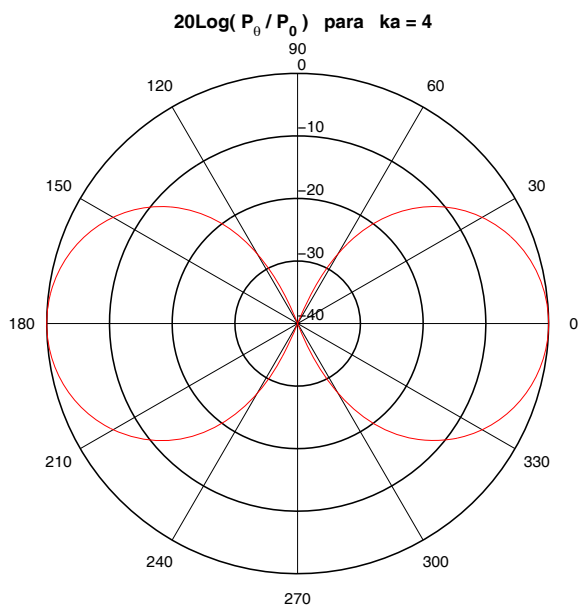
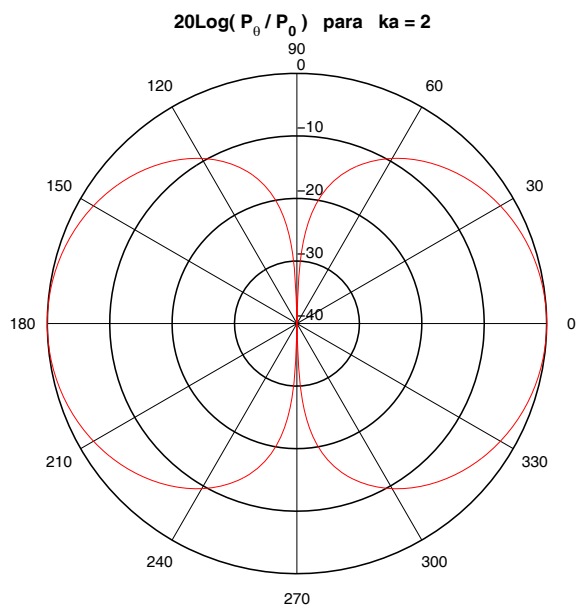
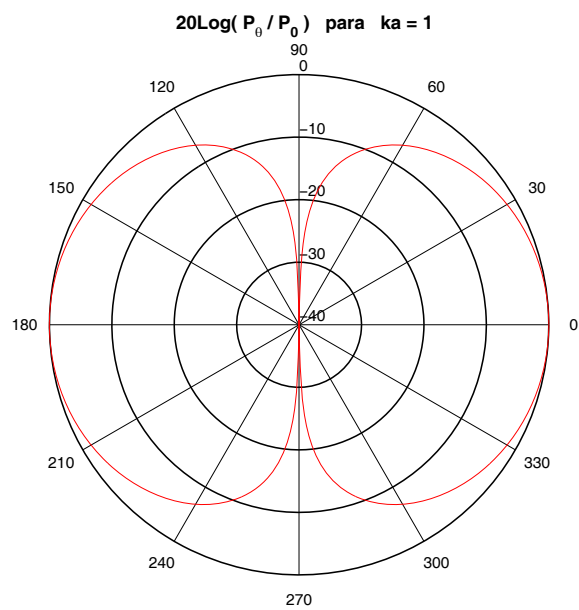
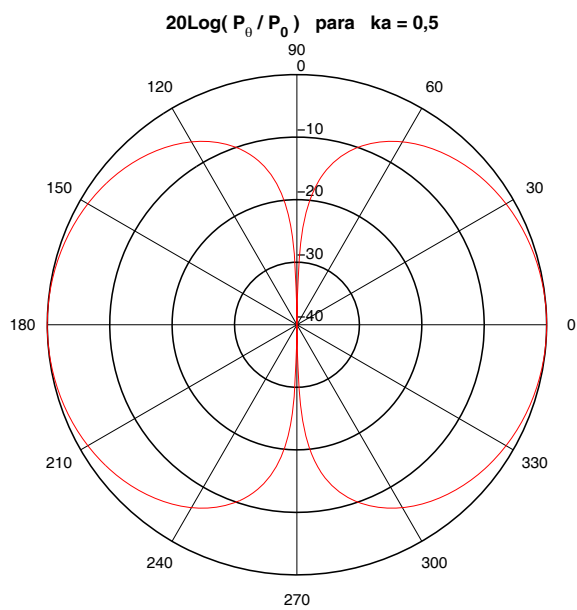
Um alto-falante ao ar livre, ou seja, sem a utilização de qualquer tipo de caixa acústica ou baffle comporta-se como um dipolo (duas fonte pontuais, próximas entre si) para $ka < 1$, onde a onda frontal cancela a onda traseira do cone fazendo com que, no plano que contem o pistão, não haja som irradiado.

Aliás, é nesta posição que devem ser investigados os ruídos mecânicos produzidos pelo alto-falante. Para isso o falante deve ser colocado com a borda ortogonalmente direcionada ao ouvido, e não com o cone apontando para ele. 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.



Diagramas polares de um woofer, montado em baffle infinito, para diversos valores de ka .



Diagramas polares referentes a um woofer, ao ar livre, para diversos valores de ka .

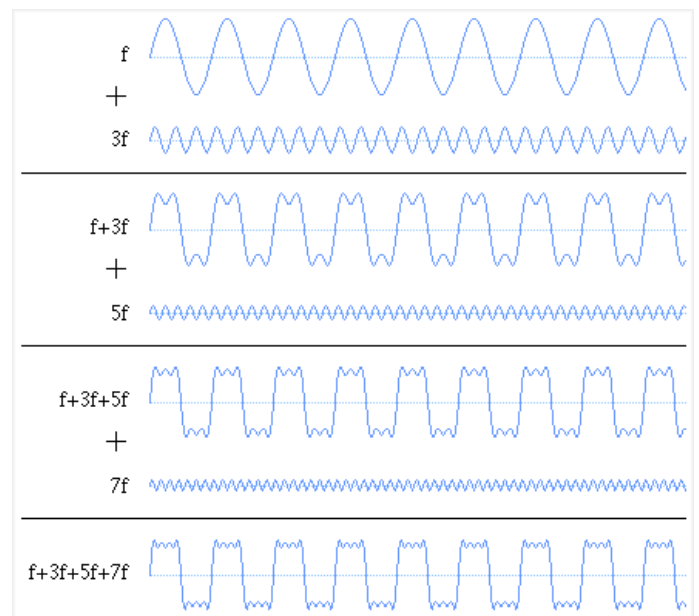
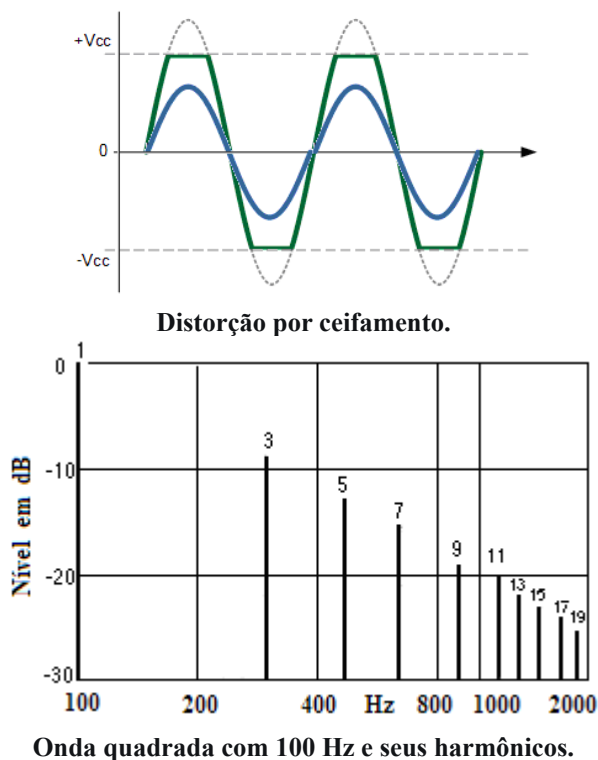
• Escolhendo o Amplificador

Recomenda-se que o amplificador seja capaz de fornecer o dobro da potência média (erradamente chamada de RMS) do alto-falante. Este headroom, de 3 dB, deve-se à necessidade de acomodar os picos que caracterizam o sinal musical, e evitar a distorção por ceifamento, que devido ao seu conteúdo harmônico aumenta perigosamente a temperatura da bobina.

A potência média, fornecida por uma onda quadrada, é o dobro da entregue por uma senoide, com mesmo valor de pico.

Um amplificador reproduzindo, sem distorção significativa, um sinal musical típico, com 10 dB de headroom, vai fornecer uma potência dez menor que a de pico, o que geralmente não é suficiente para danificar termicamente os transdutores.

Outro perigo inerente às ondas quadradas é a elevadíssima aceleração que impõe ao conjunto móvel, tanto na descida quanto na subida, pois o faz em tempos muito curtos, teoricamente nulos, o que implicaria em uma aceleração infinita, aplicando, assim, uma força igualmente infinita, que destruiria o cone.



Síntese da onda quadrada.

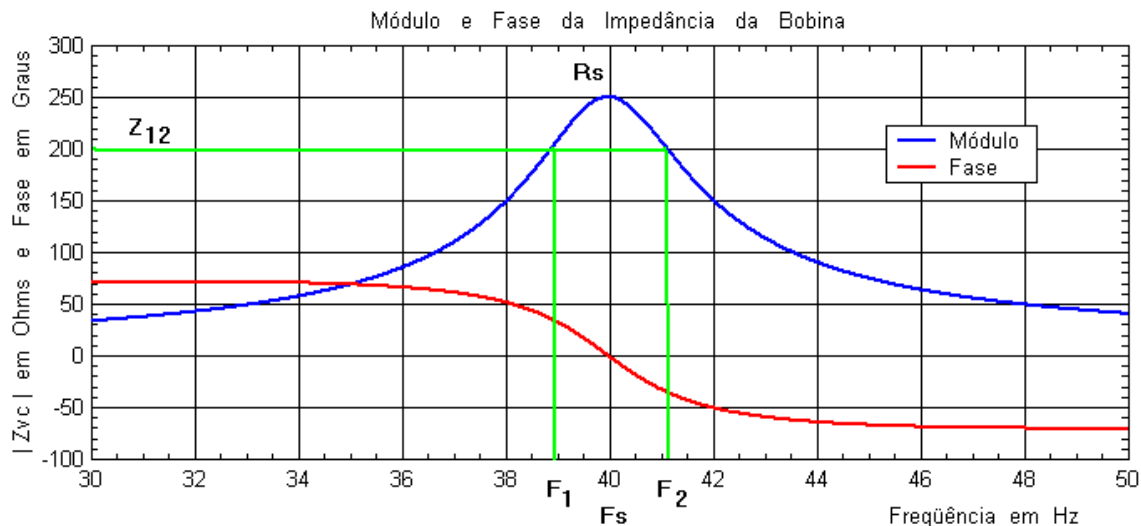
• Medindo os Parâmetros

A medição dos parâmetros Thiele-Small, F_s , Q_{ms} , Q_{es} e Q_{ts} é feita ao ar livre. Já o valor de V_{as} , embora também possa ser obtido ao ar livre, muitas vezes é medido com o falante instalado em caixa selada ou refletora de graves (*bass reflex*).

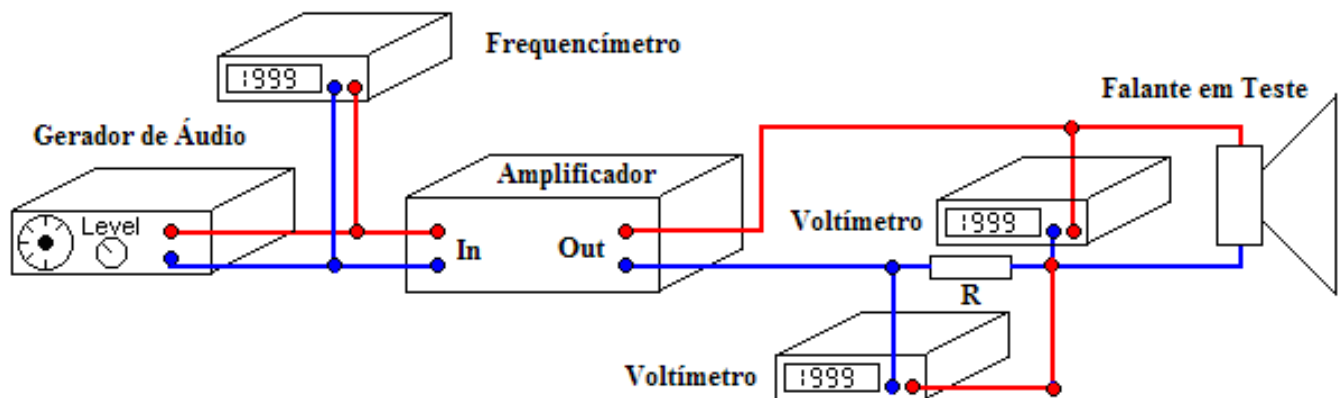
O método proposto por Thiele e Small baseia-se na curva de impedância do falante ao ar livre, onde são obtidos os valores da frequência de ressonância F_s , do pico da impedância na ressonância, R_s , e das frequências F_1 e F_2 , onde o módulo da impedância vale $R_{12} = \sqrt{R_s \cdot R_E}$, sendo R_E a resistência ôhmica da bobina.

A frequência de ressonância F_s é a média geométrica entre F_1 e F_2 , ou seja: $F_s = \sqrt{F_1 \cdot F_2}$, propriedade que é usada para testar o procedimento contra erros de operação, e também para avaliar a assimetria (em termos logarítmicos) introduzida pela indutância da bobina, na curva de impedância, em torno de F_s ,

através da equação $\text{Erro \%} = 100 \cdot \left(\frac{\sqrt{F_1 \cdot F_2}}{F_s} - 1 \right)$, onde valores até 5 % são perfeitamente aceitáveis.



A medição dos parâmetros T-S é feita na curva de impedância, em torno do pico, na frequência de ressonância.



Set up utilizado na medição dos parâmetros Thiele-Small no modo tensão constante.

O diagrama acima mostra a interligação dos equipamentos utilizados na medição dos parâmetros T-S. Como estes devem ser obtidos na região linear do deslocamento da bobina, as tensões aplicadas são pequenas, em torno de 1 Volt, ou menos, de modo que o amplificador pode ser de baixa potência (10 Watts) mas deve apresentar uma excelente resposta de baixas frequências, de preferência a partir de 5 Hz.

O resistor R deve ser o menor possível (por exemplo, 10 Ohms) e atua como um conversor corrente-tensão, evitando o uso de um medidor de corrente (na faixa de 10 mA), mas caso exista disponível, deve ser preferido ao resistor.

O método sugerido é conhecido como tensão constante, pois desprezada a queda no resistor R o falante recebe a mesma tensão durante todo o procedimento.

No entanto existe a possibilidade de medição dos parâmetros utilizando *fonte de corrente constante* (não contínua), o que dispensa completamente o uso do resistor R e o medidor de corrente, bastando voltímetro e frequencímetro, método preferido deste Autor, e já abordado em outros trabalhos.

Os parâmetros T-S são lineares e retratam um falante ideal, linear, ou aproximadamente linear. Para representar o falante real, com suas não linearidades, podemos acrescentá-las ao falante linear definido pelos parâmetros de Thiele-Small.

Na página seguinte temos um roteiro de medição que pode ser usado com o *set up* aqui sugerido.

Depois segue-se uma tabela que orienta a obtenção dos parâmetros tanto pelo método da tensão constante quanto o da corrente constante.

Sequência da Medição com Alto – Falante ao Ar Livre

1 – Com o multímetro na escala de Ohms meça a resistência da bobina R_E .

2 – Instale o falante no suporte.

3 – Faça as conexões conforme a figura acima.

4 – Varie a frequência do gerador de áudio até obter tensão máxima no voltímetro ligado ao falante.

5 – Ajuste o ganho do gerador e/ou do amplificador de modo a obter 1 V no voltímetro ligado ao falante.

6 – Leia o valor de E_s , indicado pelo voltímetro ligado no falante, que deverá ser máxima e igual a 1 V.

7 – Obtenha frequência de ressonância ao ar livre, F_s , no gerador de áudio ou no frequencímetro.

8 – Calcule I_s dividindo a tensão no resistor R pelo valor do resistor, ou seja: $I_s = E_{R_{min}} / R$.

9 – Calcule o valor da impedância do falante na ressonância (pico) usando $R_s = E_s / I_s$.

10 – Calcule o módulo da impedância do falante nas frequências F_1 e F_2 usando $R_{12} = \sqrt{R_s \cdot R_E}$.

11 – Calcule a tensão $E_{R_{12}}$, sobre o resistor R , em F_1 e F_2 , usando $E_{R_{12}} = \frac{1 + R/R_s}{1 + R_{12}/R} \cdot E_s$ onde $E_s = 1$ V.

12 – Meça F_1 abaixando a frequência do gerador (em relação a F_s) até obter $E_{R_{12}}$ Volts sobre o resistor R .

13 – Meça F_2 aumentando a frequência do gerador (em relação a F_s) até obter $E_{R_{12}}$ V sobre o resistor R .

14 – Calcule $Q_{ms} = \frac{\sqrt{F_2 \cdot F_1}}{F_2 - F_1} \cdot \sqrt{\frac{R_s}{R_E}}$

15 – Calcule o Erro % = $100 \cdot \left(\frac{\sqrt{F_1 \cdot F_2}}{F_s} - 1 \right)$

16 – Calcule $Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{\frac{R_s}{R_E} - 1}$

17 – Calcule $Q_{ts} = Q_{ms} \cdot \frac{R_E}{R_s}$

18 – Adicione ao falante uma massa M , conhecida.

19 – Meça a freq. de ressonância com massa, F_{SM} .

20 – Calcule a massa móvel

$$M_{ms} = \frac{M}{\left(\frac{F_s}{F_{SM}} \right)^2 - 1}$$

A unidade de M_{ms} será a mesma de M .

21 – Calcule a compliância $C_{ms} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot F_s)^2 \cdot M_{ms}}$

C_{ms} em metro / Newton e M_{ms} em Kg.

22 – Calcule o fator de força $\beta L = \sqrt{\frac{R_E \cdot \sqrt{M_{ms}}}{Q_{es} \cdot C_{ms}}}$

23 – Meça o Diâmetro Efetivo do Conde D

24 – Calcule a área efetiva do cone $S_D = \pi \cdot D^2 / 4$

25 – Calcule o Volume Equivalente do Falante, V_{as} , em m^3 para a pressão atmosférica P em mili Bares.

$V_{as} = 140,3426 \cdot S_D^2 \cdot C_{ms} \cdot P_{(mb)}$
(Multiplicar por 1000 para litros)

C_{ms} em m / N
 S_D em m^2

Exemplo da Medição com Alto – Falante ao Ar Livre

$$1 - R_E = 5,5 \, \Omega \quad \text{e} \quad R = 10 \, \Omega$$

$$6 - E_s = 1 \, \text{V}$$

$$7 - F_s = 40 \, \text{Hz} \quad 8 - I_s = E_{R_{\min}} / R = 0,044 / 10 = 0,0044 \, \text{A} = 4,4 \, \text{mA}.$$

$$9 - R_s = E_s / I_s = 1 / 0,0044 = 227,27 \, \Omega$$

$$10 - R_{12} = \sqrt{R_s \cdot R_E} = \sqrt{227,27 \cdot 5,5} = 35,36 \, \Omega.$$

$$11 - E_{R_{12}} = \frac{1 + R/R_s}{1 + R_{12}/R} \cdot E_s = \frac{1 + 10/227,27}{1 + 35,36/10} \cdot 1 = 0,230 \, \text{V} = 23 \, \text{mV}$$

$$12 - F_1 = 33,0 \, \text{Hz}$$

$$13 - F_2 = 48,8 \, \text{Hz}$$

$$14 - Q_{ms} = \frac{\sqrt{F_2 \cdot F_1}}{F_2 - F_1} \cdot \frac{\sqrt{R_s}}{\sqrt{R_E}} = \frac{\sqrt{48,8 \cdot 33}}{48,8 - 33} \cdot \sqrt{\frac{227,27}{5,5}} = 16,33$$

$$15 - \text{Erro} \% = 100 \cdot \left(\frac{\sqrt{F_1 \cdot F_2}}{F_s} - 1 \right) = 100 \cdot \left(\frac{\sqrt{33 \cdot 48,8}}{40} - 1 \right) = 0,33 \%$$

$$16 - \text{Calcule } Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{\frac{R_s}{R_E} - 1} = \frac{16,33}{\frac{227,27}{5,5} - 1} = 0,405$$

$$17 - \text{Calcule } Q_{ts} = Q_{ms} \cdot \frac{R_E}{R_s} = 16,33 \cdot \frac{5,5}{227,27} = 0,395$$

$$18 - \text{Massa adicionada } M = 50 \, \text{g}$$

$$19 - F_{SM} = 31,72 \, \text{Hz}$$

$$20 - M_{ms} = \frac{M}{\left(\frac{F_s}{F_{SM}} \right)^2 - 1} = \frac{50}{\left(\frac{40}{31,72} \right)^2 - 1} = 84,72 \, \text{g}$$

$$21 - C_{ms} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot F_s)^2 \cdot M_{ms}} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 40)^2 \cdot 84,72 / 1000} = 178,9 \cdot 10^{-6} \, \text{m/N} = 178,9 \, \mu\text{m/N}$$

$$22 - \beta L = \sqrt{\frac{R_E \cdot \sqrt{M_{ms} / C_{ms}}}{Q_{es}}} = \sqrt{\frac{5,5 \cdot \sqrt{84,7 \cdot 10^{-3} / 178,9 \cdot 10^{-6}}}{0,405}} = 17,2$$

$$23 - \text{Diâmetro Efetivo do Conde } D = 33,1 \, \text{cm} = 0,0331 \, \text{m}$$

$$24 - \text{Área efetiva do cone } S_D = \pi \cdot D^2 / 4 = \pi \cdot 0,0331^2 / 4 = 0,0861 \, \text{m}^2$$

$$25 - \text{Pressão Atmosférica } P = 1016 \, \text{mili Bares}$$

$$V_{as} = 140,3426 \cdot S_D^2 \cdot C_{ms} \cdot P_{(mb)} = 140,3426 \cdot 0,0861^2 \cdot 178,9 \cdot 10^{-6} \cdot 1016 = 0,14259 \, \text{m}^3 = 142,59 \, \text{L}$$

MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS THIELE - SMALL																						
										Temp.		°C										
										Pres. Atm.		mb										
↑ MARCA ALTO – FALANTE MODELO ↓										Umidade		%	↑ CÓDIGO					DATA ↓				
										Vel. Som C		m / s										
										Dens. Ar ρ		Kg / m³			-			-				
ALTO – FALANTE AO AR LIVRE - TENSÃO CONSTANTE																						
R _E	F _S	E _S	I _S (mA)	R _S E _S / I _S	R ₁₂ √R _S · R _E	I ₁₂ (mA) Es / R ₁₂	F ₁	F ₂	Êrro % 100 · (√F ₁ · F ₂ / F _S - 1)	Qms √F ₂ · F ₁ / F ₂ - F ₁ · √R _S / R _E												
No cálculo de Qms o uso da média geométrica √F ₂ · F ₁ , no lugar de Fs, confere maior precisão ao método.																						
Obtenção da Frequência de Ressonância F _{SM} com Massa Adicionada M, em Kg, ao Ar Livre										Qes	Qts											
Massa M em g		Mms		Cms			βL			Qms R _S / R _E - 1	Qms · R _E / R _S											
F _{SM} em Hz		M (F _S / F _{SM}) ² - 1		1 (2 · π · F _S) ² · Mms			√R _E · √Mms / Cms Qes															
S _D em m ²						μm / N			T · m													
ALTO – FALANTE EM CAIXA SELADA - TENSÃO CONSTANTE																						
R _E	F _C	E _C	I _C (mA)	R _C E _C / I _C	R ₁₂ √R _C · R _E	I ₁₂ (mA) Ec / R ₁₂	F ₁	F ₂	Êrro % 100 · (√F ₁ · F ₂ / F _C - 1)	Qmc √F ₂ · F ₁ / F ₂ - F ₁ · √R _C / R _E												
Var. Massa Acústica		F _S na Caixa		Vas			Caixa Selada			Qec	Qtc											
K = Qtc / Qts · Fs / Fc		F _{SB} = Fs / √K		ρ · C ² · S _D ² · Cms 140,3 · P _(mb) · S _D ² · Cms			α = Qtc / Qts · Fc / Fs - 1			Qmc R _C / R _E - 1	Qmc · R _E / R _C											
Vb		Vas		Cms			Mms			Rms	Res											
Litros		α · Vb		10 ⁻³ · Vas ρ · C ² · S _D ²			1 4 · π ² · Fs ² · Cms			√Mms / Cms Qms	R _E · Qms / Qes											
βL				N _O %						SPL _(1W@1m)												
√Rms · Res				9,6 · 10 ⁻⁸ · F _S ³ · Vas / Qes (Vas em L)						112 + 10 · Log (η _O % / 100)												
				T · m						%						dB						

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Análise de Alto-Falantes pelo Método de Thiele - Small
Homero Sette Silva
Livro inédito
- 2 - Cursel, Volumes 1 a 15
Homero Sette
Disponível em www.homerosette.com.br
- 3 - O Alto-Falante em Regime de Grandes Sinais – Uma Abordagem Introdutória
Homero Sette Silva
Apresentado no I Congresso AES Brasil, em 1996, disponível em www.homerosette.com .
- 4 - Medição dos Parâmetros dos Alto-Falantes com Diferentes Instrumentos
Homero Sette Silva
Apresentado no II Congresso AES Brasil, em 1997, disponível em www.homerosette.com .
- 5 - Variação da Resistência da Bobina Móvel em Função da Temperatura
Homero Sette Silva
Apresentado no IV Congresso AES Brasil, em 2000, disponível em www.homerosette.com
- 6 - Potência “RMS” ou Potência Média ?
Homero Sette Silva
Apresentado no VIII Congresso AES Brasil, em 2004, disponível em www.homerosette.com
- 7 - Limitando a Potência em Drivers e Alto-Falantes
Homero Sette Silva
Apresentado no IX Congresso AES Brasil, em 2005, disponível em www.homerosette.com
- 8 - Atenuação do Som no Ar por Absorção
Homero Sette Silva
Apresentado no X Congresso AES Brasil, em 8/5/2006, disponível em www.homerosette.com
- 9 - Medição dos Parâmetros dos Alto-Falantes com Diferentes Instrumentos II
Homero Sette Silva
Apresentado no XII Congresso AES Brasil, em 5/5/2008, disponível em www.homerosette.com
- 10 - Circuito Equivalente Elétrico do Alto - Falante com Ênfase no Deslocamento do Cone
Homero Sette Silva
Apresentado no XVIII Congresso AES Brasil, em 2014
- 11 - O Meio Ambiente Acústico
Homero Sette Silva
Disponível em www.homerosette.com
- 12 - Apresentando o Subwoofer 2x18” SW6000Nd
Homero Sette e Mauro Ludovico (*ambos da 4VIAS Pro Áudio: www.4vias.com.br*).
Disponível em www.homerosette.com
- 13 - <http://www.speakerwizard.co.uk/2014/04/>
- 14 - <http://www.roger-russell.com/wire/wire.htm>
- 15 - http://www.stonessoundstudio.com.au/stone/diy_speaker_info/diy_driver_types_p3.htm

Woofer de 15" profissional desenvolvido para atender as mais diversas necessidades de sonorização de médios e pequenos ambientes, apresentando excelente desempenho na reprodução de médias e baixas frequências.

Indicado para reforço de som em boates, clubes, salões, auditórios, conjuntos musicais e também para caixas monitoras.

A sua grande eficiência na reprodução sonora deve-se à excelente combinação de seus componentes.

- O cone leve fabricado com fibras longas e a suspensão em tecido impregnado proporcionam ao conjunto móvel grande estabilidade, alto rendimento e baixa distorção.

- A bobina móvel é fabricada com fio resistente a altas temperaturas e enrolada em fôrma de Kapton®.

- A carcaça em chapa de aço reforçada, com pintura epoxi, confere ao conjunto elevada resistência mecânica.

- A calota em alumínio garante uma perfeita dissipação do calor proveniente da bobina móvel.

- O uso de adesivos de alta resistência garante aos componentes uma ótima colagem e durabilidade.

*15PW5-SLF: Produto sem logotipo frontal Selenium impresso na calota.

A exposição à níveis de ruído além dos limites de tolerância especificados pela Norma Brasileira NR 15 - Anexo 1*, pode causar perdas ou danos auditivos. A Selenium não responsabiliza-se pelo uso indevido de seus produtos. (*Portaria 32.14/78).

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Diâmetro nominal	380 (15)	mm (in)
Impedância nominal	8	
Impedância mínima @ 180 Hz	6,4	
Potência		
Programa Musical ¹	700	W
RMS (NBR 10.303) ²	350	W
AES ³	350	W
Sensibilidade (2,83V @ 1m) média entre 100 e 2.000 Hz	98	dB SPL
Compressão de potência @ 0 dB (pot. nom.)	3,0	dB
Compressão de potência @ -3 dB (pot. nom.)/2	1,9	dB
Compressão de potência @ -10 dB (pot. nom.)/10	0,6	dB
Resposta de frequência @ -10 dB	40 a 3.000	Hz

¹ Especificações para uso de programa musical e de voz, permitindo distorção harmônica máxima no amplificador de 5%, sendo a potência calculada em função da tensão na saída do amplificador e da impedância nominal do transdutor.

² Norma Brasileira NBR 10.303, com a aplicação de ruído rosa durante 2 horas ininterruptas.

³ Norma AES (60 - 600Hz).

PARÂMETROS DE THIELE-SMALL

Fs (frequência de ressonância)	40	Hz
Vas (volume equivalente do falante)	190	l
Qts (fator de qualidade total)	0,40	
Qes (fator de qualidade elétrico)	0,41	
Qms (fator de qualidade mecânico)	16,82	
o (eficiência de referência em meio espaço)	2,90	%
Sd (área efetiva do cone)	0,08605	m²
Vd (volume deslocado)	4 90,0	cm³
Xmáx (deslocamento máx. (pico) c/ 10% distorção)	5,7	mm
Xlím (deslocamento máx. (pico) antes do dano)	12,0	mm

Condições atmosféricas no local de medição dos parâmetros TS:

Temperatura	25	°C
Pressão atmosférica	1 016	mb
Umidade relativa do ar	51	%

Parâmetros de Thiele-Small medidos após amaciamento de 2 horas com metade da potência NBR.

É admitida uma tolerância de $\pm 15\%$ nos valores especificados.

PARÂMETROS ADICIONAIS

L	17,0	Tm
Deslocamento de fluxo no gap	1,14	T
Diâmetro da bobina	75	mm
Comprimento do fio da bobina	26,0	m
Coefficiente de temperatura do fio ()	0,00368	1/°C
Temperatura máxima da bobina	240	°C
vc (temperatura máx. da bobina/potência máx.)	0,69	°C/W
Hvc (altura do enrolamento da bobina)	19,5	mm
Hag (altura do gap)	8,0	mm
Re (resistência da bobina)	5,5	g
Mms (massa móvel)	84,6	m/N
Cms (compliance mecânica)	183,9	kg/s
Rms (resistência mecânica da suspensão)	1,3	

PARÂMETROS NÃO-LINEARES

Le @ Fs (indutância da bobina na ressonância)	4,612	mH
Le @ 1 kHz (indutância da bobina em 1 kHz)	1,303	mH
Le @ 20 kHz (indutância da bobina em 20 kHz)	0,404	mH
Red @ Fs (resistência de perdas na ressonância)	0,34	
Red @ 1 kHz (resistência de perdas em 1 kHz)	4,32	
Red @ 20 kHz (resistência de perdas em 20 kHz)	44,79	
Krm (coeficiente da resistência de perdas)	4,690	m
Kxm (coeficiente da indutância da bobina)	39,660	mH
Erm (expoente da resistência de perdas da bobina)	0,781	
Exm (expoente da indutância da bobina)	0,609	

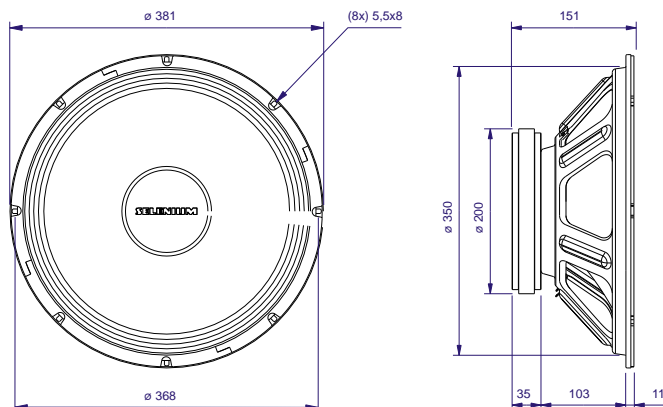


INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Material do ímã	Ferrite de bário
Peso do ímã	2.440 g
Diâmetro x altura do ímã	200 x 19 mm
Peso do conjunto magnético	6.215 g
Material da carcaça	Chapa de aço
Acabamento da carcaça	Pintura epoxi, cor preta
Acabamento das arruelas	Cromatização azul
Material do fio da bobina	Cobre
Material da fôrma da bobina	Poliimida (Kapton®)
Material do cone	Celulose fibra longa
Volume ocupado pelo falante	4,3 l
Peso líquido do falante	7.090 g
Peso total (incluindo embalagem)	8.135 g
Dimensões da embalagem (C x L x A)	40 x 39 x 17 cm

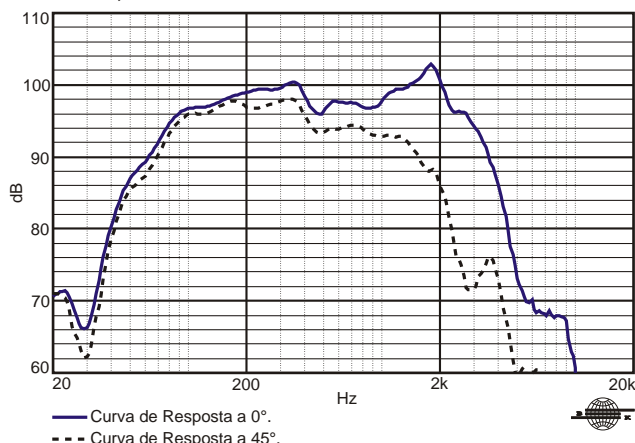
INFORMAÇÕES PARA MONTAGEM

Número de furos de fixação	8
Diâmetro dos furos de fixação	5,5 mm
Diâmetro do círculo dos furos de fixação	367 mm
Diâmetro do corte para montagem frontal	352 mm
Diâmetro do corte para montagem traseira	348 mm
Tipo do conector	Soldável
Polaridade	Tensão + no (+): deslocamento p/ frente
Distância mín. entre parede da caixa e a traseira do falante	75 mm

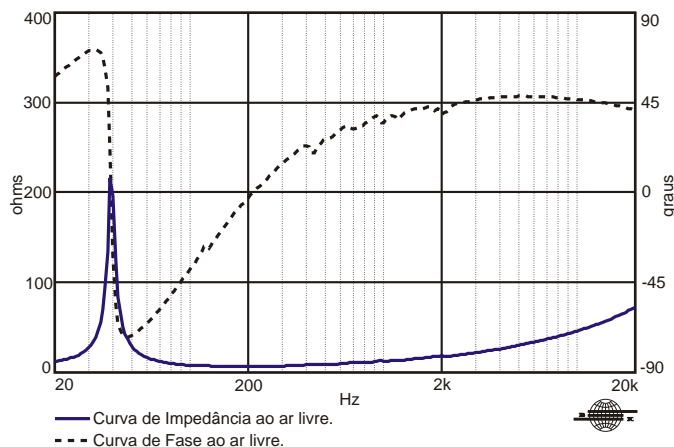


Dimensões em mm.

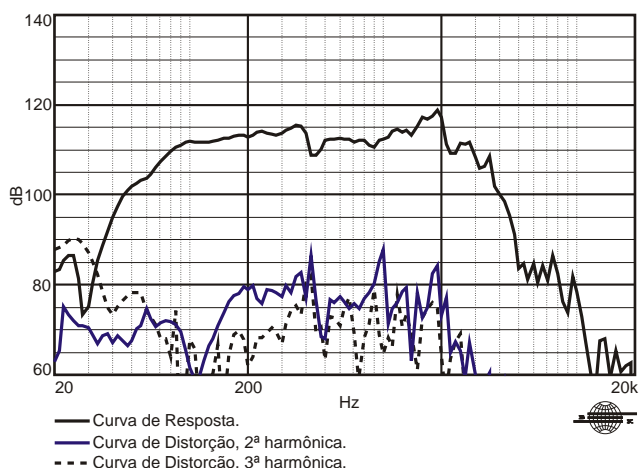
CURVAS DE RESPOSTA (0° e 45°) NA CAIXA DE TESTE EM CÂMARA ANECÓICA, 1 W / 1 m



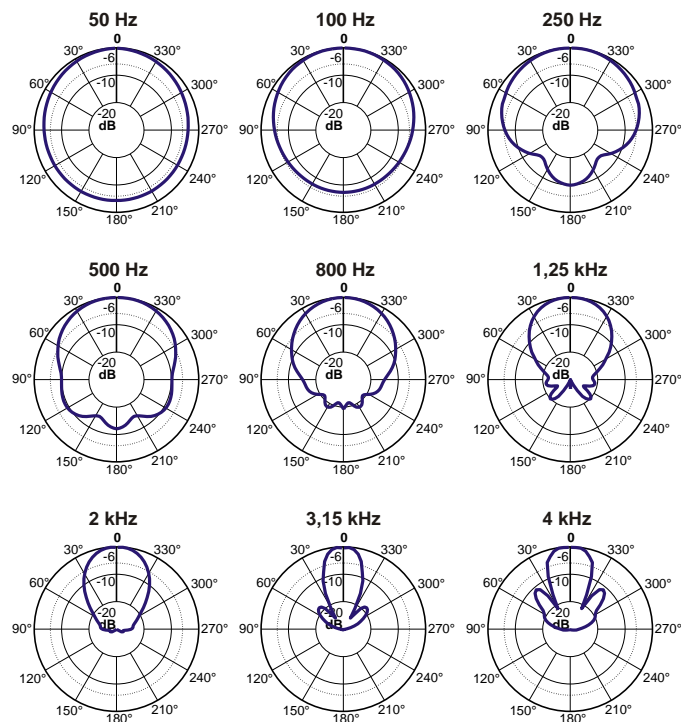
CURVAS DE IMPEDÂNCIA E FASE AO AR LIVRE



CURVAS DE DISTORÇÃO HARMÔNICA A 10% DA POTÊNCIA NBR, A 1 m



CURVAS DE RESPOSTA POLAR



COMO ESCOLHER O AMPLIFICADOR

O amplificador deve ser capaz de fornecer o dobro da potência RMS do alto-falante. Este headroom de 3 dB deve-se à necessidade de acomodar os picos que caracterizam o sinal musical.

CALCULANDO A TEMPERATURA DA BOBINA

Evitar que a temperatura da bobina ultrapasse seu valor máximo é extremamente importante para a durabilidade do produto. A temperatura da bobina pode ser calculada através da equação:

$$T_B = T_A + \frac{R_B}{R_A} \cdot \frac{1}{T_A} \cdot 25 \cdot \frac{1}{25}$$

T_A , T_B = temperaturas da bobina em °C.

R_A , R_B = resistência da bobina nas temperaturas T_A e T_B , respectivamente.

= coeficiente de temperatura do condutor, a 25 °C.

COMPRESSÃO DE POTÊNCIA

A elevação da resistência da bobina com a temperatura provoca uma redução na eficiência do alto-falante. Por esse motivo, se ao dobrarmos a potência elétrica aplicada obtivermos um acréscimo de 2 dB no SPL ao invés dos 3 dB esperados, podemos dizer que houve uma compressão de potência de 1 dB.

COMPONENTES NÃO-LINEARES DA BOBINA

Devido ao acoplamento com a ferragem do conjunto magnético, a bobina dos alto-falantes eletrodinâmicos exibe um comportamento não-linear que pode ser modelado através de diversos parâmetros. Os parâmetros K_{rm} , K_{xm} , E_{rm} , E_{xm} , por exemplo, permitem calcular o valor da resistência e da indutância da bobina em função da frequência.

PROJETO(S) DE CAIXA(S) ACÚSTICA(S) SUGERIDA(S)

Para outros projetos de caixas acústicas, consulte nossa home-page.

CAIXA DE TESTE UTILIZADA

Caixa bass reflex c/ 1 duto ø 12,5 cm e 2 cm de comprimento, volume interno de 110 litros.

Kapton®: Marca Registrada da Du Pont.

Devido aos avanços tecnológicos, reservamo-nos o direito de inserir modificações sem prévio aviso.
Página: 2/2 Rev.: 01 - 05/03

SELENIUM EUROPE
Germany
www.seleniumloudspeakers.com

SELENIUM USA
USA
www.seleniumloudspeakers.com

ELETRÔNICA SELENIUM S.A.
BR 386 Km 435 - CEP: 92.480-000
Nova Santa Rita - RS - Brasil
Tel.: (51) 479-4000 - Fax: (51) 479-1150
Atendimento Técnico 0800 51 4161
Atendimento Comercial 0800 51 4114
www.selenium.com.br