

O ALTO-FALANTE EM REGIME DE GRANDES SINAIS

- Uma Abordagem Introdutória -

Homero Sette Silva

O objetivo deste trabalho é mostrar os fatos básicos que acontecem com o alto-falante, e os parâmetros que o descrevem, quando submetido a elevados níveis de potência, o que fatalmente provocará o aquecimento da bobina, elevando a temperatura desta, pôr vezes, acima de 200°C , produzindo também grandes deslocamentos no cone, o que implicará no surgimento de não linearidade nos parâmetros, o que se traduz em distorção harmônica.

Introdução

O modelo proposto pôr Neville Thiele⁽¹⁾ e ampliado Richard H. Small⁽²⁾, e outros pesquisadores, para representar o alto-falante na região de freqüências baixas, baseado no sistema de Analogias Eletro-Mecano-Acústicas resumidas no Quadro 1, foi concebido para pequenos sinais, ou seja, a tensão aplicada na bobina do falante é pequena o suficiente para que a potência dissipada na bobina e o deslocamento do cone sejam mínimos, garantindo assim um comportamento o mais linear possível.

Os chamados parâmetros de Thiele-Small, utilizados para caracterizar e prever o comportamento do alto-falante são medidos nas condições acima, com a aplicação de tensões iguais ou menores que 1 Volt ou, no caso da utilização de fontes de corrente, escolhem-se valores geralmente compreendidos entre 10 e 50 mA.

Com a utilização generalizada do modelo originalmente proposto (Fig. 1) foi-se percebendo, ao longo do tempo, a necessidade da representação de comportamentos não lineares que se evidenciavam mesmo para pequenos sinais, tais como a influência da freqüência na componente resistiva da impedância da bobina bem como na própria indutância da bobina (Fig. 2).

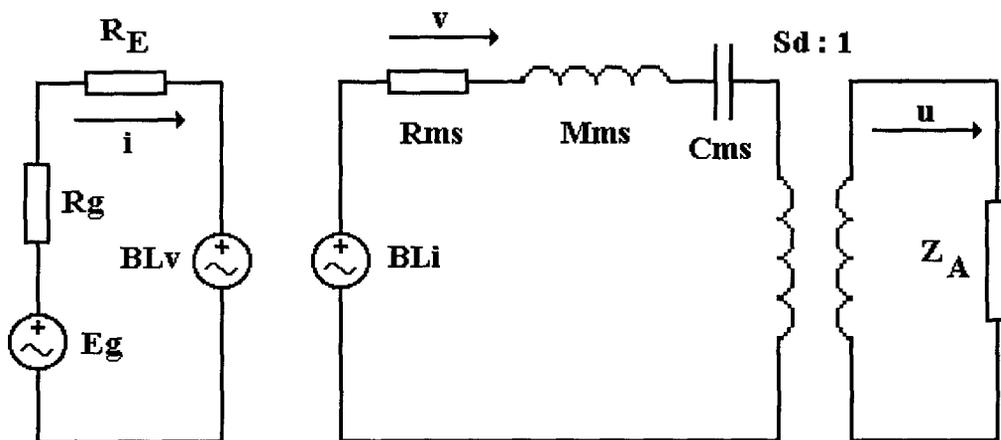


Fig. 1 - Modelo linear de Thiele e Small.

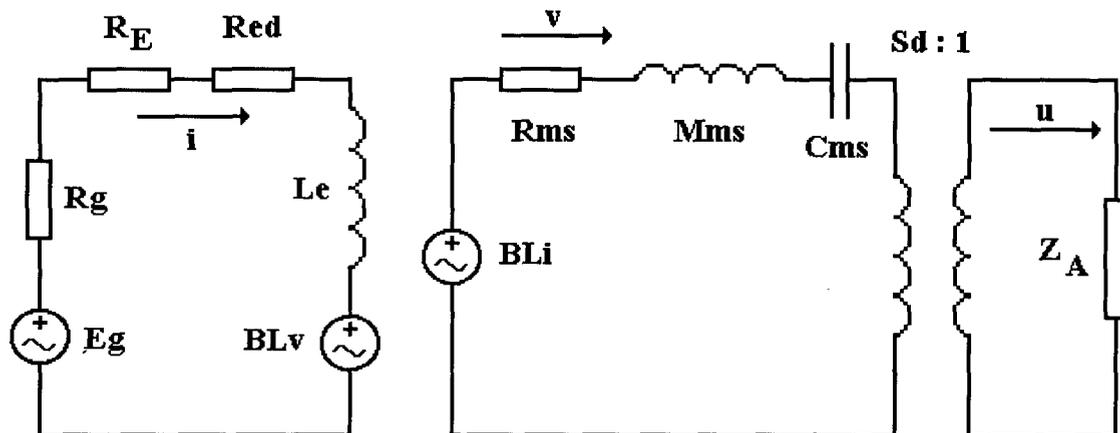


Fig. 2 - Modelo Equivalente de Thiele e Small, não linear, incorporando os componentes R_{ed} e L_e , que variam com a frequência.

Variação de R_{ed} e L_e com a Frequência

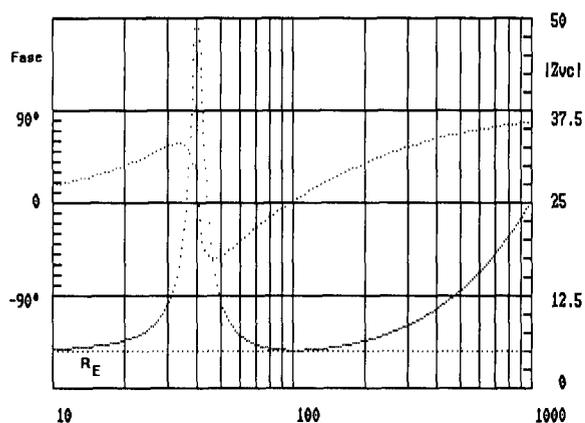


Fig. 3 - Curvas de Módulo e Fase da Impedância, considerando L_e constante e desprezando R_{ed} .

A indutância da bobina L_e , considerada desprezível na análise de baixas frequências⁽³⁾, diminui com o aumento da frequência, sendo a responsável pelo crescimento reativo da impedância da bobina em frequências médias e altas, fato que deve ser levado em conta no projeto dos transdutores e dos crossovers passivos.

A parte puramente resistiva da bobina do alto-falante divide-se em duas componentes: a resistência ôhmica R_E (corrente contínua) e uma outra, em série com a primeira, denominada R_{ed} , que aumenta com a frequência, e representa as perdas devido às correntes de Eddy, induzidas na ferragem do conjunto magnético.

Em experiência realizada, um falante com 3,4 ohms de R_E apresentou em 7 kHz um valor de R_{ed} igual a 25 ohms, fazendo com que, nessa fre-

quência, a componente resistiva total $R_e = R_E + R_{ed}$ fosse igual a 28,4 ohms, valor suficiente para diminuir a eficiência do falante e aumentar o problema do descasamento de impedância nos crossovers passivos.

Comparando as Figs. 3 e 4 vemos que a componente R_{ed} é a responsável pôr ser a impedância nominal (região após o pico da impedância onde a impedância é mínima) maior que a resistência R_E .

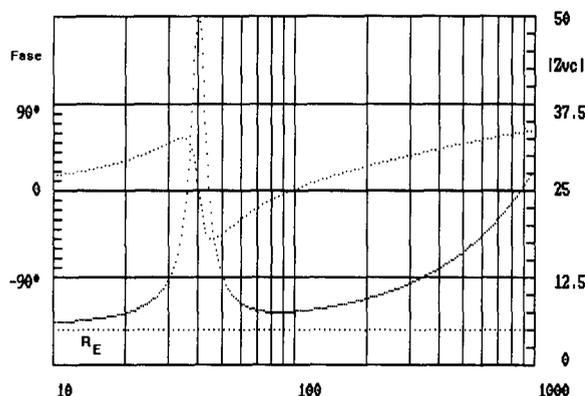


Fig. 4 - Curvas de Módulo e Fase da Impedância, levando-se em conta a influência da frequência em R_{ed} e considerando L_e constante.

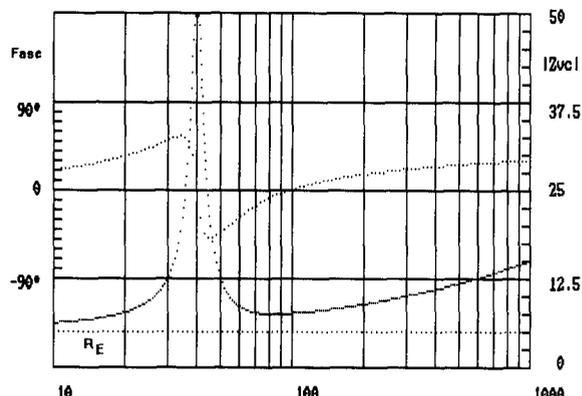


Fig. 5 - Curvas de Módulo e Fase da Impedância, levando-se em conta a influência da frequência tanto em R_{ed} quanto em L_e .

Quadro 1 - Analogias Eletro - Mecano - Acústicas		
ACÚSTICO	MECÂNICO	ELÉTRICO
Pressão Sonora p	Força f	Tensão e
N/m^2	Newton	Volt
Velocidade Volumétrica u	Velocidade v	Corrente i
m^3/s	m/s	Ampère
Volume Deslocado v	Deslocamento x	Carga q
m^3	metro	Coulomb
Resistência Acústica R_a	Resistência Mecânica R_m	Resistência R
$N \cdot s/m^5 = Kg/s \cdot m^4$	$N \cdot s/m = Kg/s$	Ohm
Massa Acústica M_a	Massa M	Indutância L
$Kg/m^4 = N \cdot s^2/m^5$	Kg	Henry
Complância Acústica C_a	Complância Mecânica C_m	Capacitância C
m^5/N	m/N	Farad
Impedância Acústica Z_a	Impedância Mecânica Z_m	Impedância Z
$p/u [N \cdot s/m^5]$	$f/v [N \cdot s/m]$	$e/i [Ohm]$

ELÉTRICO	MECÂNICO	ACÚSTICO
Z_E	$(\beta L)^2 / Z_E$	$(\beta L)^2 / Z_E Sd^2$
$(\beta L)^2 / Z_M$	Z_M	Z_M / Sd^2
$(\beta L)^2 / Z_A Sd^2$	$Z_A \cdot Sd^2$	Z_A
R_E	$(\beta L)^2 / R_E$	$(\beta L)^2 / R_E Sd^2$
R_g	$(\beta L)^2 / R_g$	$(\beta L)^2 / R_g Sd^2$
$R_{es} = (\beta L)^2 / R_{ms}$	R_{ms}	$R_{as} = R_{ms} / Sd^2$
$C_{mes} = M_{ms} / (\beta L)^2$	M_{ms}	$M_{as} = M_{ms} / Sd^2$
$L_{ces} = (\beta L)^2 \cdot C_{ms}$	C_{ms}	$C_{as} = C_{ms} \cdot Sd^2$
E_g	$f = E_g \cdot \beta L / (R_g + R_E)$	$p = E_g \cdot \beta L / (R_g + R_E) Sd$

Quadro 2 - Parâmetros Tradicionais

$$\begin{aligned} \text{Complância Mecânica} &= \text{Deslocamento/Força} \quad [\text{Metro/Newton}] \\ &= \text{Deslocamento}/9,81 \cdot \text{Massa} \quad [\text{s}^2 / \text{Kg}] \end{aligned}$$

$$C_{ab} = V_b / \rho C^2 = \text{Complância Acústica do Ar em um Volume } V_b \quad [\text{m}^4 \text{ s}^2 / \text{Kg}]$$

$$C_{ms} = \text{Complância Mecânica da Suspensão} \quad [\text{Metro/Newton}]$$

$$C_{as} = \text{Complância Acústica da Suspensão} = C_{ms} \cdot S_d^2 \quad [\text{m}^5 / \text{N}]$$

$$R_{as} = \text{Resistência Acústica devido às perdas na Suspensão} \quad [\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^5]$$

$$R_{ms} = \text{Resistência Mecânica da Suspensão} = R_{as} \cdot S_d^2 \quad [\text{Kg/s}]$$

$$S_d = \text{Área Efetiva do Diafragma} \quad [\text{Metro}^2]$$

$$M_{as} = \text{Massa Acústica do Diafragma} = M_{ms} / S_d^2 \quad [\text{Kg/Metro}^4]$$

$$\beta L = \text{Densidade de Fluxo} \cdot \text{Comprimento Efetivo da Bobina} \quad [\text{T} \cdot \text{m}]$$

$$R_E = \text{Resistência da bobina} \quad [\text{ohms}]$$

Quadro 3 - Parâmetros THIELE-SMALL

$$F_s = \text{Frequência de Ressonância} = 1/2\pi(M_{ms} \cdot C_{ms})^{1/2} \quad [\text{Hz}]$$

$$V_{as} = \text{Volume Equivalente} = \rho C^2 \cdot C_{as} \quad [\text{metros cúbicos}]$$

$$= \text{Volume de ar com uma Complância igual a } C_{as}$$

$$\text{o que implica em } C_{as}/C_{ab} = V_{as}/V_b = \alpha$$

$$Q_{es} = \text{Fator de Qualidade Elétrico} = (M_{ms} \cdot C_{ms})^{1/2} \cdot R_E / (\beta L)^2$$

$$Q_{ms} = \text{Fator de Qualidade Mecânico} = (M_{ms} \cdot C_{ms})^{1/2} / R_{ms}$$

$$Q_{ts} = \text{Fator de Qualidade Total} = (M_{ms} \cdot C_{ms})^{1/2} / [R_{ms} + (\beta L)^2 / R_E]$$

$$= Q_{es} // Q_{ms} = Q_{es} \cdot Q_{ms} / (Q_{es} + Q_{ms})$$

$$\approx Q_{es} \text{ pois, em geral, } Q_{ms} \gg Q_{es}$$

$$n_o = \text{rendimento ou eficiência de referência}$$

$$n_o = (4\pi^2 / C^3) F_s^3 \cdot V_{as} / Q_{es} = 9,6 \cdot 10^{-10} \cdot F_s^3 \cdot V_{as} / Q_{es} \quad (\rho / V_{as} \text{ em } L)$$

$$n_o = (\rho / 2\pi C) \cdot (S_d / M_{ms})^2 \cdot [(\beta L)^2 / R_E]$$

Medindo R_{ed} e L_e com $B_{lv} = 0$

A medição da componente resistiva R_{ed} , originada pelas correntes induzidas na ferragem, e da indutância L_e , ambas variando com a frequência, seria trivial, não fosse a força contra-eletromotriz induzida na bobina devido ao movimento do cone, que origina os componentes refletidos mostrados na Fig. 6.

Este inconveniente fica superado quando o cone do falante está mecanicamente impedido de se movimentar (bloqueado), ou quando o falante não foi ainda magnetizado.

Um falante não imantado foi utilizado inicialmente, tendo sido posteriormente magnetizado, quando teve seu cone travado.

Para bloquear o cone usamos o recurso de calçar os seus dois lados com areia fina, tendo sido suficiente cobrir pouco mais que 2/3 de sua altura.

Com o cone impedido de se movimentar, não existe força eletromotriz induzida, ficando o falante reduzido a uma simples bobina com núcleo de ferro, dotada de uma resistência ôhmica R_E , além de uma componente resistiva R_{ed} e de uma indutância L_e , conforme a Fig. 7, ambas não lineares pôr serem função da frequência.

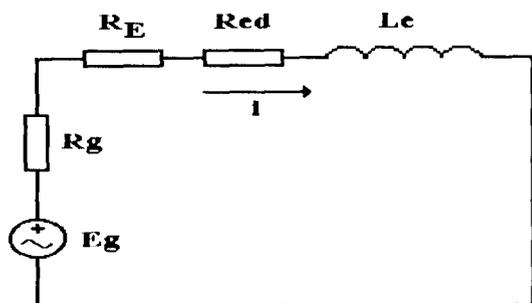


Figura 7 - Circuito equivalente visto pela bobina de um alto-falante desmagnetizado ou com o cone travado.

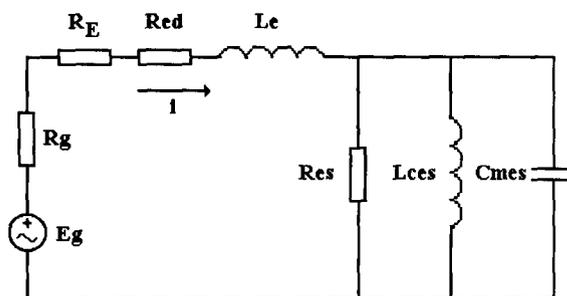


Figura 6 - Circuito Equivalente do Alto-Falante Visto pela bobina, desprezando-se a Impedância Acústica Z_A .

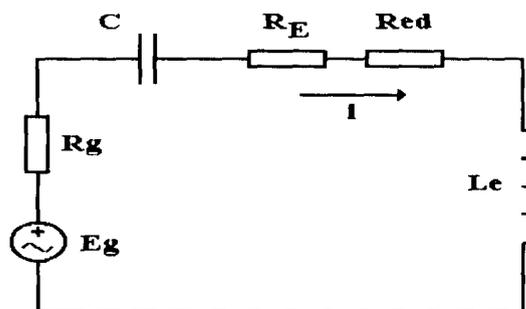


Figura 8 - Capacitor colocado em série com um alto-falante desmagnetizado ou travado para a medição de R_{ed} e L_e .

Desse modo, o circuito equivalente, visto para dentro dos terminais da bobina, apresentará uma impedância que será dada pôr (1).

Se associarmos um capacitor C , como na Fig. 8, em série com a bobina, surge uma componente capacitiva que tornará o circuito ressonante em uma determinada frequência F_0 , situação em que a impedância será puramente resistiva.

$$Z_{vc} = R_E + R_{ed} + j\omega L_e \quad \text{onde } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

$$Z_{vc} = R_E + R_{ed} + j(\omega L_e - 1/\omega C) \quad (2)$$

$$Z_{vc} = R_E + R_{ed} = R_e, \quad \text{para } f = F_0 = 1/2\pi(L_e \cdot C)^{1/2} \quad (3)$$

$$L_e = 1/(2\pi \cdot F_0)^2 \cdot C \quad (4)$$

Desse modo, associando um capacitor de valor arbitrário em série com a bobina do falante e aplicando uma tensão conhecida, varia-se a frequência até o circuito entrar em ressonância, o que será indicado pelo maior valor assumido pela corrente, ou através do método de Lissajous, com o auxílio de um osciloscópio.

O cociente entre a tensão aplicada e a corrente na ressonância, será igual à componente resistiva R_e . Subtraindo de R_e o valor da resistência R_E , medido com um ohmímetro, teremos como resultado a parcela resistiva dependente da frequência, Red .

Uma vez conhecida a frequência de ressonância, calcula-se L_e através de (4) e, repetindo o mesmo procedimento para diversos valores de C , poderemos medir Red e L_e em diversas frequências, conforme vemos nas Tabelas abaixo, respectivamente para o mesmo falante antes e depois de ser imantado.

Com o falante magnetizado, a permeabilidade magnética do ferro se modifica, daí as pequenas alterações nos parâmetros Red e L_e , nas duas situações.

Tabela 1 - Falante SELENIUM SW 124F Não Magnetizado

E (V)	I (mA)	C (uF)	F (Hz)	L_e (mH)	R_e (Ω)	R_E (Ω)	Red (Ω)
0,5	121,4	1.690	67,44	3,30	4,12	3,44	0,68
0,5	113,3	541	124,32	3,03	4,41	3,44	0,97
0,5	102,4	219	206,50	2,71	4,88	3,44	1,44
0,5	50,00	6,69	1480,5	1,73	10,00	3,44	6,56
0,5	24,60	0,994	4545,5	1,23	20,33	3,44	16,9
0,5	18,58	0,498	6913,5	1,06	26,91	3,44	23,5

Tabela 2 - O Falante anterior, após Magnetizado

E (V)	I (mA)	C (uF)	F (Hz)	L_e (mH)	R_e (Ω)	R_E (Ω)	Red (Ω)
0,5	128,05	1.690	71,11	2,96	3,90	3,44	0,46
0,5	121,2	541	136,89	2,50	4,13	3,44	0,69
0,5	107,0	219	221,8	2,35	4,67	3,44	1,23
0,5	51,8	6,69	1601,4	1,48	9,65	3,44	6,21
0,5	26,3	0,994	4741,3	1,13	19,01	3,44	15,57
0,5	19,8	0,498	7148,9	1,00	25,25	3,44	21,81

Quadro 1 - Constantes Físicas de Interesse

$$C = \text{Velocidade do Som no Ar Seco} = 331,45(1 + T/273,15)^{1/2} \text{ [m/s]}$$

T = Temperatura do Ar em Graus Celcius

$$C_{0^\circ} = 331,45 \pm 0,05 \quad C_{20^\circ} = 343,3 \quad C_{30^\circ} = 349,2 \quad C_{40^\circ} = 354,9 \text{ m/s}$$

$$\rho_o = \text{Densidade do Ar Seco} = (29/8314,32)P_{(Pa)}/[273,15 + T(^{\circ}C)]$$

$$\rho_o = \text{Densidade do Ar Seco} = (2900/8314,32)P_{(mb)}/[273,15 + T(^{\circ}C)]$$

$$\rho_o = \text{Densidade do Ar Seco} = 353,417P_{(atm)}/[273,15 + T(^{\circ}C)]$$

(Pres. atm. P em: Pascal = Newton/m², mill Bares e Atmosferas)

$$1000 \text{ mb} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa} = 0,9869 \text{ atm} = 750,06 \text{ mm Hg.}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 1013,25 \text{ mb} = 101325 \text{ Pascal}$$

Densidades do Ar Seco em [Kg/m³] a 1 atmosfera ou 760 mm Hg :

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

Obtendo Red e Led Através da Curva de Impedância

Com o falante em condições normais de funcionamento, ou seja, magnetizado e com o cone livre, podemos determinar os valores de Red e Le através de um modelo empírico proposto por Wright⁽⁴⁾, conforme as equações (5) e (6), onde os coeficientes K (proporcionais) e E (exponenciais) são obtidos a partir da medição do módulo e do ângulo de fase da impedância, em duas frequências (geralmente acima de 5 kHz) ou através de um programa de ajuste de curvas.

$$\text{Red} = K_m \omega^{\text{Em}} \quad (5)$$

$$\text{Le} = K_{xm} \omega^{(\text{Exm} - 1)} \quad (6)$$

As Figuras (9) a (11), geradas pelo programa LEAP, versão 4.5, dão uma idéia da excelente qualidade do ajuste conseguido com o modelo empírico proposto.

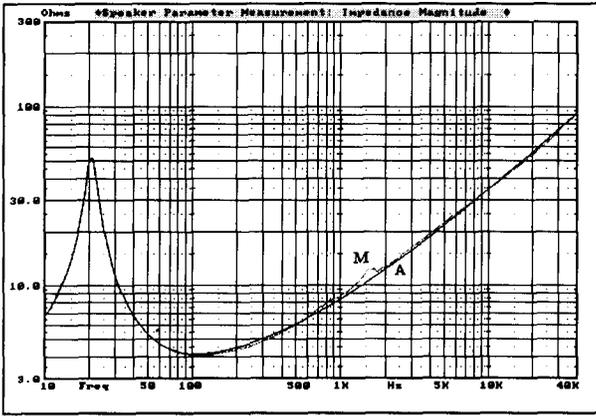


Figura 9 - Curvas do Módulo da Impedância de um falante obtidas pôr medição (M) e ajuste (A) em modelo empírico.

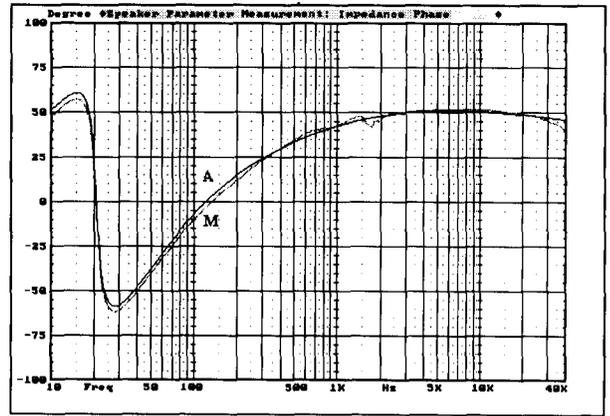


Figura 10 - Curvas de Fase da Impedância de um falante obtidas pôr medição (M) e ajuste (A) em modelo empírico.

O alto-falante utilizado para a obtenção das curvas mostradas nas Figs. (9) a (10), apresentou os seguintes parâmetros:

$$F_s = 21,16 \text{ Hz}$$

$$Q_{ms} = 5,9351 \quad Q_{es} = 0,4538 \quad Q_{ts} = 0,4216$$

$$R_{ed} = 0,0880 \ \Omega \quad L_e = 3,4340 \text{ mH} \quad \text{em } F_s$$

$$R_{ed} = 2,4532 \ \Omega \quad L_e = 0,9201 \text{ mH} \quad \text{em } 1 \text{ kHz}$$

$$R_{ed} = 32,6466 \ \Omega \quad L_e = 0,3307 \text{ mH} \quad \text{em } 20 \text{ kHz}$$

$$K_{rm} = 1,2827 \text{ m}\Omega \quad K_{xm} = 18,2465 \text{ mH}$$

$$E_{rm} = 0,8640 \quad E_{xm} = 0,6584 \quad R_E = 3,7 \ \Omega$$

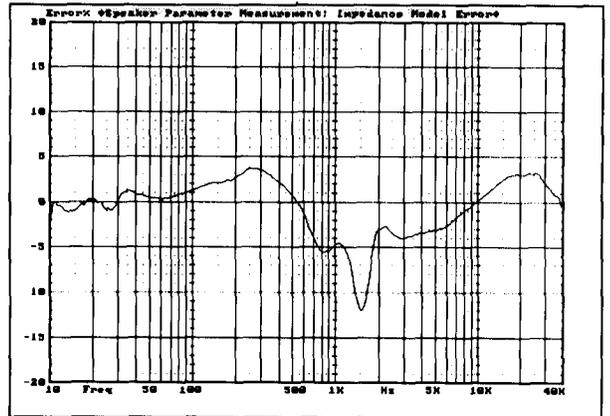


Figura 11 - Curva do erro de ajuste referente às figuras acima.

Comportamento Estático

Quando a bobina de um alto-falante é excitada pôr corrente contínua, o cone se desloca apenas durante o regime transitório, permanecendo parado, em uma nova posição, enquanto a corrente na bobina não se modificar, ou seja: o cone permanece estático durante o regime permanente.

Mesmo nessa condição trivial, podemos obter informações bastante práticas, efetuando medições da tensão, da corrente na bobina e do deslocamento sofrido pelo cone.

Em regime estacionário de corrente contínua, a impedância vista para dentro dos terminais da bobina resume-se à R_E , ou seja, a resistência ôhmica em frequência zero, de modo que a corrente será dada pôr (7),

$$I = E_g / (R_g + R_E) \quad (7)$$

onde E representa a tensão, nos terminais do gerador CC, à circuito aberto, sendo R_g sua resistência interna.

A corrente I, circulando na bobina, vai provocar o surgimento de uma força F, dada pôr (8), força esta que, no fim do transitório, terá sido totalmente aplicada sobre a compliância C_{ms} , que nada mais é que o inverso da constante de mola K, da lei de Hook, conforme a equação (9).

Através dos circuitos análogos-elétricos das Figs. (12) e (13) constatamos que a "corrente" v será nula quando o "capacitor" C_{ms} tiver se carregado com a "tensão" F, sendo X a "carga" adquirida.

$$F = (BL)I \quad (8)$$

$$F = (BL)I = K \cdot X = X/C_{ms} \quad (9)$$

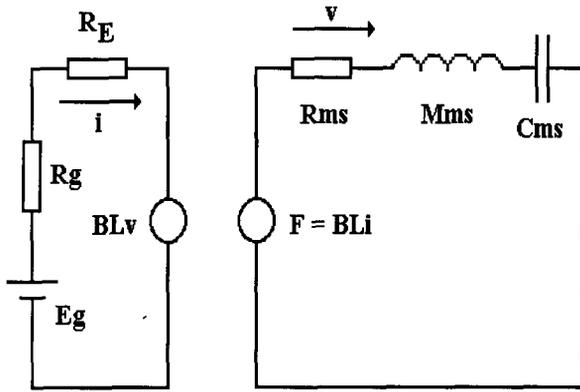


Figura 12 - Circuito equivalente de um falante excitado por corrente contínua, durante o regime transitório. A impedância acústica refletida foi desprezada, por ser insignificante.

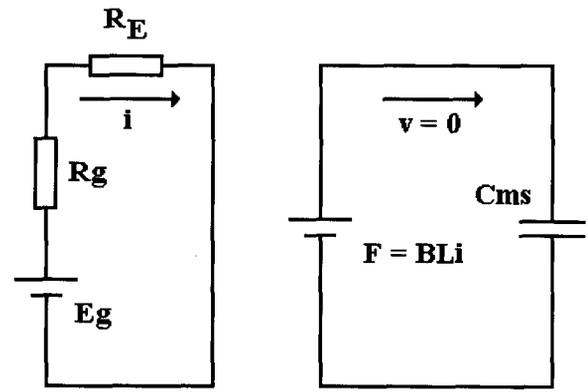


Figura 13 - Circuito equivalente de um falante excitado por corrente contínua, após atingido o regime permanente, quando a velocidade é nula e toda a força fica aplicada na compliância.

Através da equação (9), podemos facilmente relacionar o deslocamento X, experimentado pelo cone, com a corrente I, circulando pela bobina.

$$X = (BL \cdot Cms)I \tag{10}$$

Com o auxílio de uma fonte de tensão contínua ajustável de 0 a 40 V, com capacidade para 5 A, e um medidor de altura digital, usado em metrologia, fizemos diversas medições relacionando a tensão e a corrente aplicadas na bobina e o deslocamento do cone.

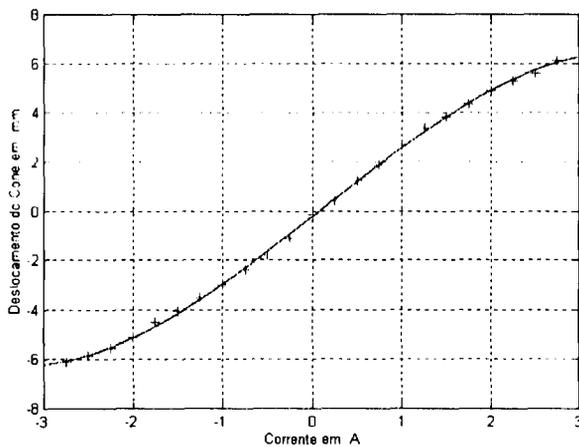


Figura 14 - Gráfico do polinômio que ajustou os pares X ; I obtidos experimentalmente (+), em um alto-falante.

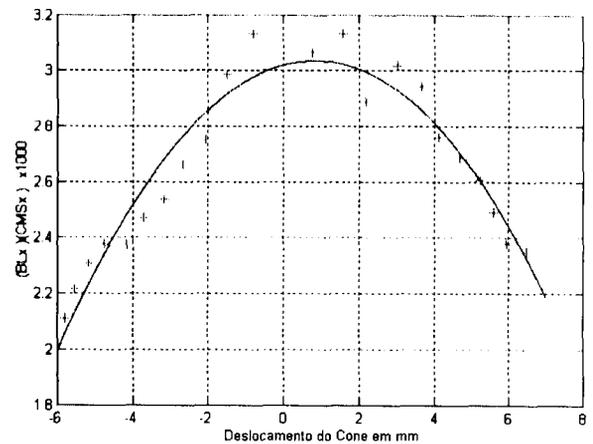


Figura 15 - Polinômio que ajustou BL·Cms, em função de X, obtido a partir do cociente entre os pares X;I da Fig. 14.

Na Fig. (14) temos o gráfico do deslocamento do cone em função da corrente circulando na bobina e, na Fig. (15), temos a representação do produto BL·Cms. Em ambos os casos podemos verificar que a referida quantidade, supostamente constante, na realidade varia com o deslocamento X.

Em uma experiência, levada a efeito para caracterizar a variação da compliância mecânica Cms, isoladamente do produto BL (densidade de fluxo magnético no gap vezes o comprimento de fio enlaçado por esse fluxo) lançou-se mão do artifício de provocar sucessivos deslocamentos no cone do alto-falante, medindo-se em cada um deles a frequência de ressonância.

Para deslocar sucessivamente o cone, encontramos, na literatura, dois procedimentos, que se caracterizavam pela utilização de:

- 1 - Câmara pressurizada e controlada por servo-mecanismo⁽⁴⁾ com o alto-falante nela instalado, como em uma caixa acústica;
- 2 - Fonte de corrente alternada senoidal, de pequena amplitude, superposta a uma fonte de corrente constante contínua⁽⁵⁾, conforme o esquema da Fig. (16).

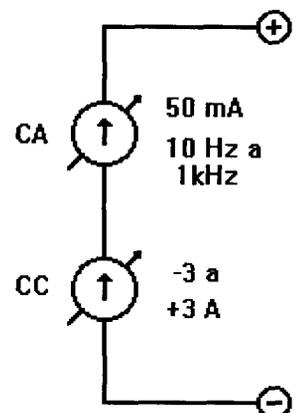


Figura 16 - Fonte de CA constante, 50 mA de 10 Hz a 1 kHz, e fonte de CC, variável de -3 a +3 A.

Como no momento da experiência não dispúnhamos de nenhuma das alternativas acima, utilizamos um alto-falante com duas bobinas aplicando uma fonte de tensão contínua, variável, em uma delas, para provocar deslocamento no cone e uma fonte de corrente alternada na segunda bobina, conforme ilustra a Fig. (17).

Para cada valor de corrente contínua, que vai corresponder a uma nova posição do cone, foi efetuada uma medida da frequência de ressonância, estando os resultados obtidos resumidos na curva da Fig. (18).

Mesmo pequenos deslocamentos do cone provocam pequenas mas mensuráveis variações na frequência de ressonância.

Isso explica os diferentes valores de F_s obtidos com o falante na posição vertical (como usualmente se vê nas caixas acústicas) ou com o mesmo na horizontal (cone para cima ou para baixo), onde o cone é deslocado pela gravidade, que gera uma força proporcional à massa do cone, conforme a equação (11), onde índice x indica que a quantidade é uma função do deslocamento X.

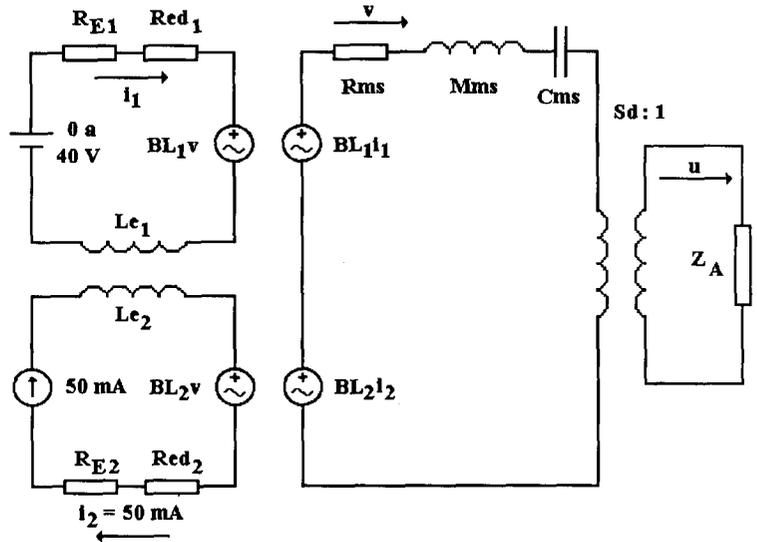


Figura 17 - Alto-falante com duas bobinas, uma delas utilizada para deslocar o cone, fazendo com que assuma sucessivas posições de repouso, sendo a frequência de ressonância medida através da segunda bobina.

$$F = 9,81 \cdot Mms = K \cdot X = X / Cms_x \tag{11}$$

$$X = 9,81 \cdot Mms \cdot Cms_x = (9,81 / 4\pi^2) / Fs_x^2 = 0,2485 / Fs_x^2 \tag{12}$$

Substituindo o produto $Mms \cdot Cms_x$ pela expressão equivalente $(1/4\pi^2) / Fs_x^2$, podemos relacionar o deslocamento sofrido pelo cone, pôr efeito da gravidade, com sua frequência de ressonância.

Alto-falantes com baixos valores de F_s apresentam maiores deslocamentos estáticos do cone, quando montados horizontalmente, do que outros de ressonância mais elevada.

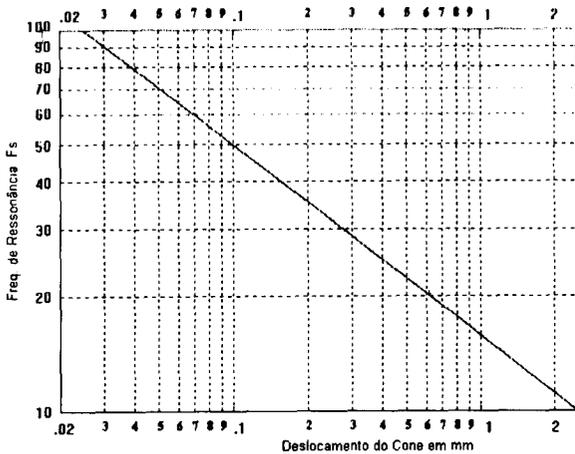


Figura 18 - Deslocamento do cone provocado pela gravidade, em função da frequência de ressonância, com o cone do falante paralelo ao plano horizontal.

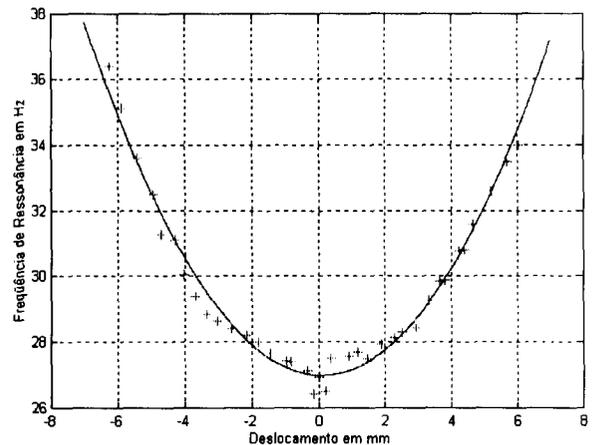


Figura 19 - Frequência de Ressonância em função do Deslocamento do Cone do alto-falante. Valores medidos (+) e a equação de ajuste $Fs_x = 0,2136X^2 - 0,0382X + 26,9941$

Através do cociente ao quadrado das frequências de ressonância medidas com a falante na vertical e, posteriormente, na horizontal, podemos determinar o valor da nova compliância, função do deslocamento, através da equação (13) e, se conhecida a massa móvel Mms , pode-se determinar Cms_x através de (14).

$$Cms_x = Cms(Fs/Fs_x)^2 \tag{13}$$

$$Cms_x = 1/4\pi^2 Mms \cdot Fs_x^2 \tag{14}$$

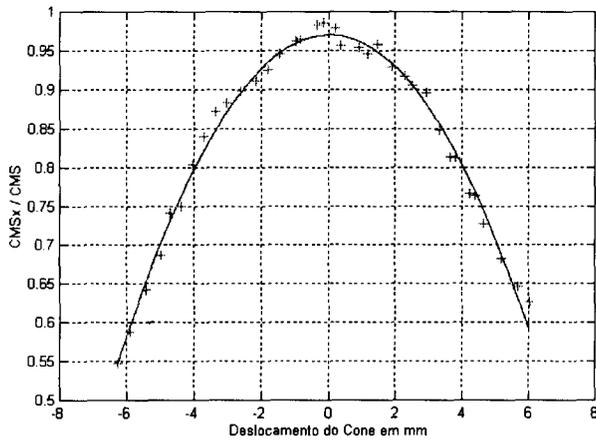


Figura 20 - Variação relativa da Compliância, em função do deslocamento do cone.

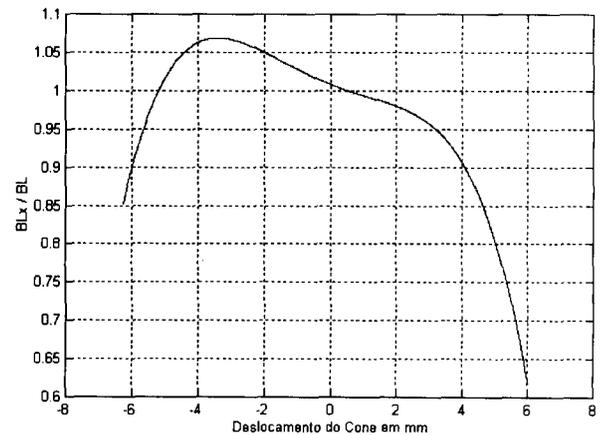


Figura 21 - Variação relativa do Fator de Força, em função do deslocamento do cone.

A Fig. 19 mostra as variações sofridas pela Frequência de Ressonância, em função de diversos valores de corrente contínua aplicados em uma das bobinas, o que deslocou o cone para várias posições diferentes de repouso. O aumento da Frequência de Ressonância com o deslocamento deve-se à diminuição da compliância, conforme a Fig. 20.

Através de processamento executado com o software MATLAB versão 4.0, que também gerou as demais curvas, obtivemos a Fig. 21 (muito semelhante à Fig. 6, da referência ⁽⁶⁾) onde vemos a variação relativa do Fator de Força, com o deslocamento do cone.

Tanto BL quanto Cms diminuem com o deslocamento do cone mas o aumento experimentado pelo Fator de Força tão logo penetrou no gap sugere uma maior densidade de fluxo magnético no interior do mesmo, o que costuma ocorrer em falantes que não possuem campo simétrico (peça polar ligeiramente prolongada em relação à arruela superior, pôr exemplo).

O interesse na análise do comportamento das quantidades BL e Cms deve-se ao fato de que, como aparecem como fator de proporcionalidade comum nas equações da Pressão Acústica na saída das caixas acústicas⁽⁷⁾ e $F_{(s)}$ é um polinômio que varia conforme o tipo da caixa, como em (15), será responsável pôr grande parte da distorção produzida pelo alto-falante, principalmente nas baixas frequências, que correspondem a grandes deslocamentos do cone.

$$Pr_{(s)} = Eg_{(s)} \cdot (\rho / 2\pi r) \cdot [Sd / (Rg + R_E)] \cdot (\beta L \cdot Cms) \cdot F_{(s)} \quad (15)$$

Variação de R_E com a Temperatura

A resistência da bobina do alto-falante aumenta de valor com a temperatura, segundo a equação (16) onde β é o coeficiente de variação da resistência com a temperatura, a 25 °C, sendo α o mesmo só que para uma temperatura qualquer T_A . No caso da temperatura ambiente T_A ser igual a 25 °C, isso implica em que $\alpha = \beta$. A equação (17) fornece a temperatura T_B em função de R_{TB}

$$R_{TB} = R_{TA} [1 + \alpha(T_B - T_A)] \quad \text{onde} \quad \alpha = 1 / (T_A - 25 + 1/\beta) \quad (16)$$

$$T_B = T_A + [(R_{TB} / R_{TA}) - 1] / \alpha \quad (17)$$

Os valores de β variam conforme o material do fio da bobina:

$$\beta = 0,00385 \text{ para o cobre} \quad \text{e} \quad \beta = 0,00401 \text{ para o alumínio}$$

R_{TB} = Resistência da Bobina na Temperatura T_B

R_{TA} = Resistência da Bobina na Temperatura Ambiente T_A

Na Fig. 22 temos a representação da equação (18).

$$R_{TB} / R_{TA} = 1 + \alpha(T_B - T_A) \quad (18)$$

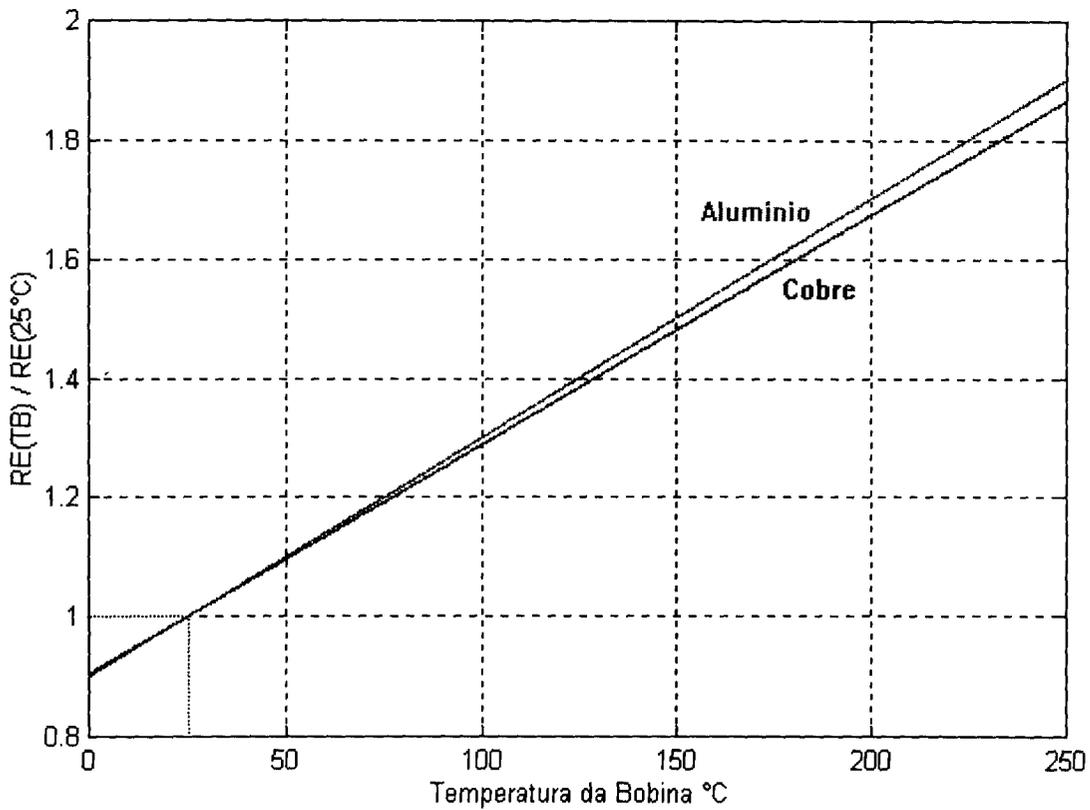


Figura 22 - Variação relativa, da resistência a 25 °C , com a temperatura, para fios de Cobre e de Alumínio.

Em uma experiência realizada, foram aplicados diversos valores de tensão contínua, na bobina de um falante e medidas as respectivas correntes circulando. Fazendo um gráfico com os pares (tensão ; corrente), conforme a Fig. 23, onde notamos claramente o significativo aumento da resistência com a corrente, pôr efeito da elevação da temperatura na bobina.

Podemos notar, também, que o aumento da resistência foi maior para valores positivos da corrente, ou seja, com a bobina saindo do conjunto magnético, o que reduz sua troca de calor com o meio circundante, em virtude do maior afastamento da ferragem, muito melhor condutora de calor que o ar.

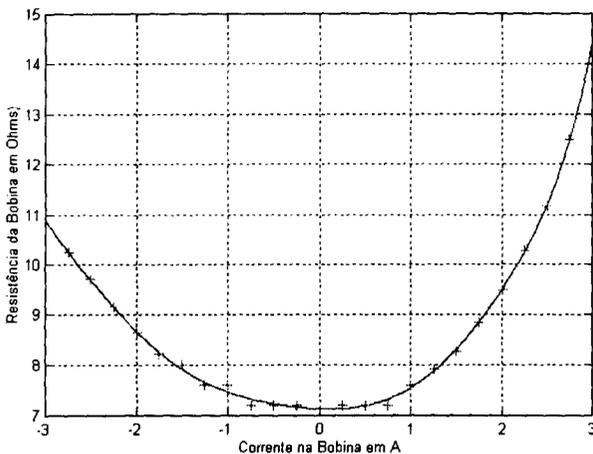


Figura 23 - Resistência da Bobina em função da corrente. Dados obtidos experimentalmente e polinômio de ajuste.

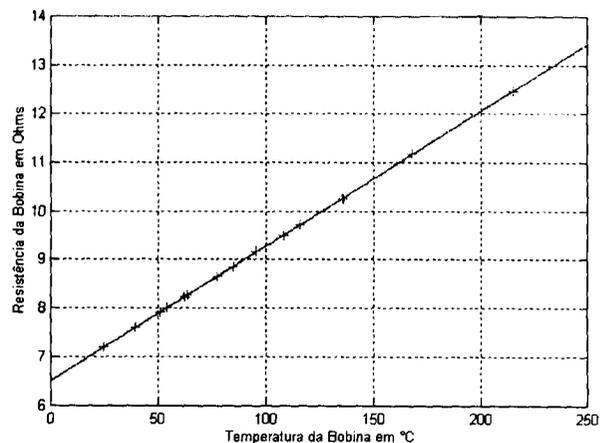


Figura 24 - Resistência da Bobina em função da temperatura. Dados obtidos experimentalmente e ajustados pelo polinômio $R_{tb} = 0,0277Tb + 6,507$.

Os valores de resistência acima obtidos, foram correlacionados com as respectivas temperaturas da bobina, através da equação (17), o que permitiu a construção do gráfico da Fig. 24 onde podemos ver a perfeita concordância com o polinômio de ajuste, perfeitamente dentro do previsto pela equação (16).

Determinando a Temperatura da Bobina Dinamicamente

Conhecer a temperatura da bobina de um falante, durante seu funcionamento normal é algo de grande interesse prático, podendo essa informação ser utilizada para a proteção dos alto-falantes do sistema.

O circuito da Fig. 25, sugerido pela Ferrofluidics Corp.⁽⁸⁾, aplica uma corrente contínua de pequeno valor, na bobina do falante. Como o amplificador está acoplado ao falante através de um capacitor não polarizado, de elevado valor, a tensão contínua nos terminais do falante vai depender do valor da fonte V_s , da resistência série R_s e da resistência da bobina do alto-falante.

Um voltímetro CC mede, constantemente, o valor médio da tensão na bobina, graças ao filtro passa baixas RC, que será função do valor de R_E e da corrente cc na bobina.

Sendo o valor de R_s muito maior que R_E , o circuito terá o comportamento de uma fonte de corrente constante, fazendo com que a tensão contínua E_v , lida pelo voltímetro, que é a mesma na bobina, seja diretamente proporcional à sua resistência, como em (19). Caso essa desigualdade não se verifique podemos utilizar a equação (20). Combinando as equações (19) ou (20) com (16) e (17), podemos calcular a temperatura da bobina.

$$R_E = (E_v/E_s) \cdot R_s \quad \text{se } R_s \gg R_E \quad (19)$$

$$R_E = R_s / (-1 + E_s/E_v) \quad (20)$$

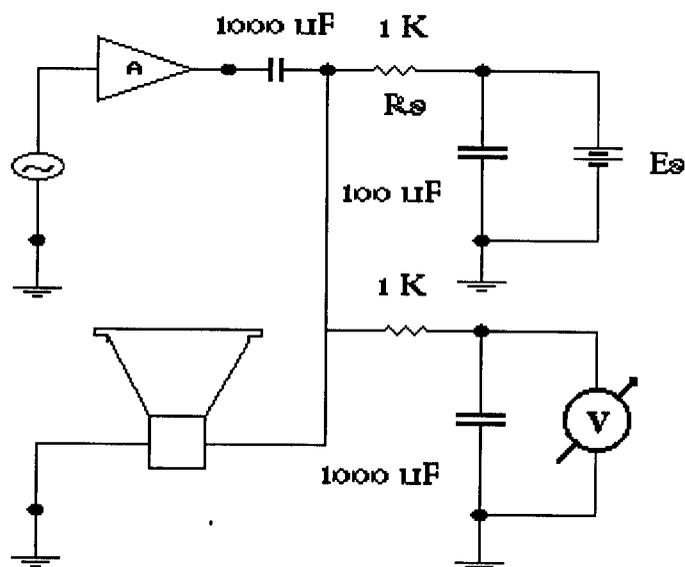


Figura 25 - Circuito utilizado para determinar o valor da resistência da bobina com o alto-falante em funcionamento, o que permite calcular a temperatura da bobina em operação.

Outra possibilidade para determinar a temperatura da bobina consiste em utilizar (21), que relaciona os valores da tensão E_v , lida pelo voltímetro, com a bobina na temperatura ambiente T_A e na temperatura de funcionamento T_B , respectivamente E_A e E_B . Vale ressaltar que, nesse caso, não precisamos conhecer o valor de R_s .

$$T_B = \{ [E_B (E_s - E_A) / E_A (E_s - E_B)] - 1 \} / \alpha + T_A \quad (21)$$

A Influência de R_E nos Parâmetros do Alto-Falante

A resistência R_E influi no valor de diversos parâmetros, fazendo com que a Eficiência de Referência N_0 diminua e os Fatores de Qualidade Q_{es} e Q_{ts} aumentem, conforme podemos verificar no fluxograma da pag. 14, baseado nas equações do Quadro 3.

A diminuição da eficiência produz a chamada Compressão de Potência, onde um aumento de 20 dB na potência elétrica aplicada no alto-falante produzirá um incremento na potência acústica menor que 20 dB.

Como o aumento de R_E é ocasionado pela elevação da temperatura na bobina, o calor ali produzido irá aumentar a compilaria da aranha (fato não quantificado), diminuindo com isso, a alteração que seria esperada nos fatores de qualidade. Com o aumento da Compilaria, a Frequência de Ressonância F_s diminui e o Volume Equivalente V_{as} cresce.

Não podemos nos esquecer que o aquecimento na bobina provavelmente estará acompanhado de elevados deslocamentos do cone, o que altera, conforme vimos, os valores de BL e C_{ms} .

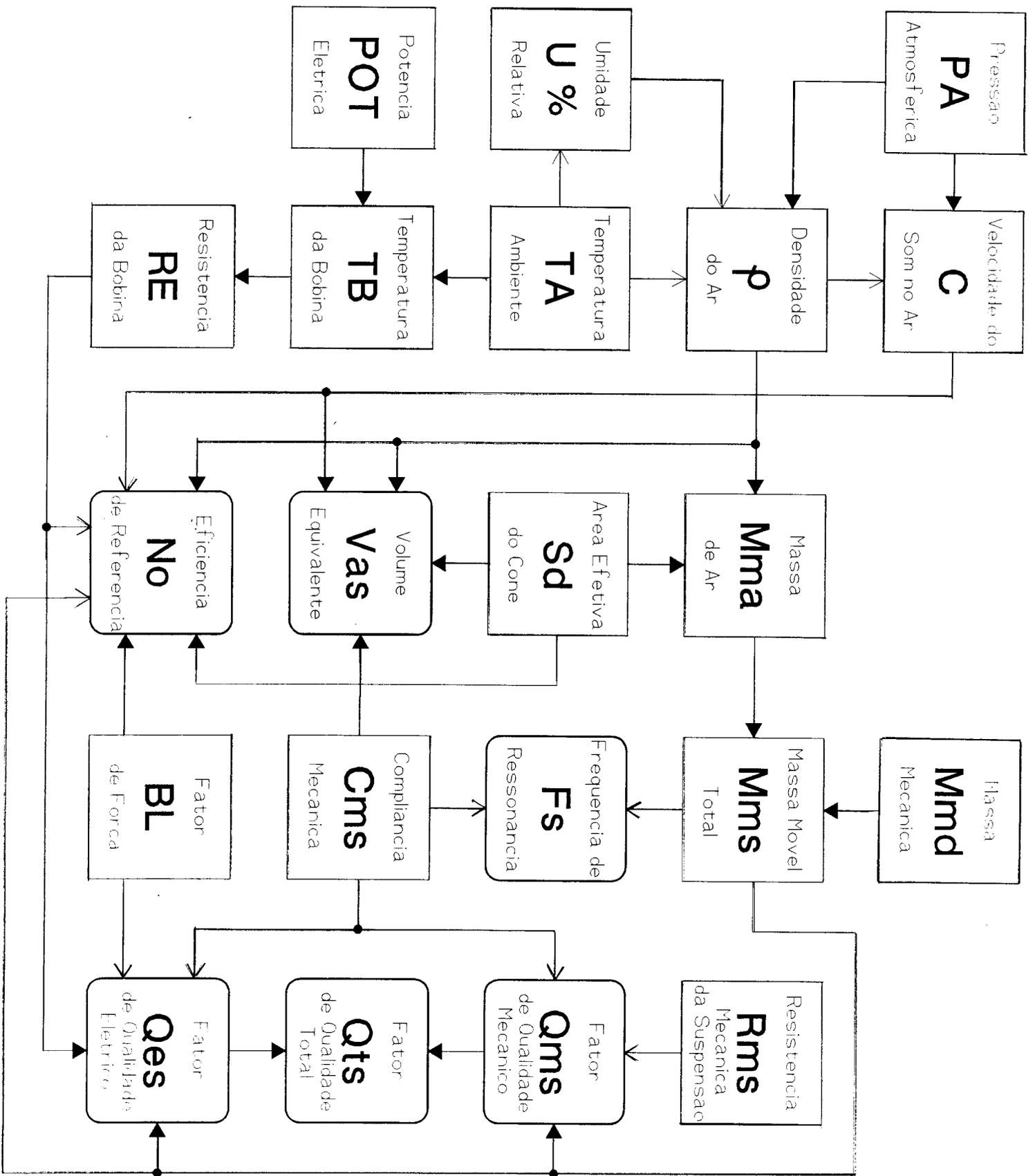
Na Fig. 26 temos as curvas de resposta de um mesmo alto-falante com 1 Watt e 25 °C na bobina e com 100 Watts, o que elevou a temperatura da bobina para 106,7 °C.

A Fig. 27, que mostra a curva de 100 Watts subtraída dos 20 dB a mais de potência que foram aplicados em relação à curva de 1 Watt, facilita visualizar o fato de que a eficiência caiu em torno de 2 dB.

Parâmetros	25 °C	107 °C
R_E Ω	6,90	9,07
F_s Hz	44,43	42,83
V_{as} L	161,87	174,18
Q_{ts}	0,662	0,950
Q_{es}	0,690	1,036
Q_{ms}	16,586	11,373
BL T·m	14,71	13,51
C_{ms} $\mu\text{m/N}$	165,63	178,22
M_{ms} g	77,50	77,50

Tabela 3 - Parâmetros do alto-falante em função da temperatura.

PARAMETROS DO ALTO-FALANTE



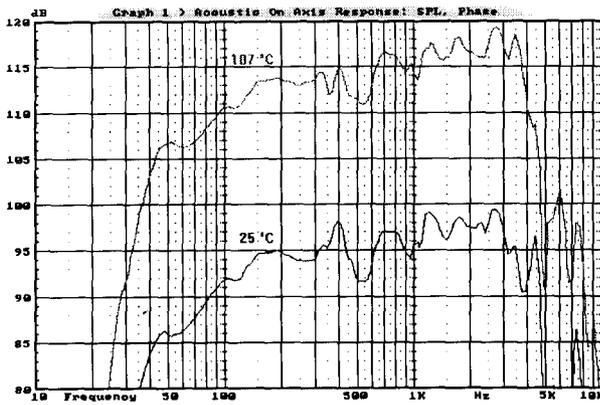


Figura 26 - Curvas de Resposta de um falante com 1 Watt e 25 °C na bobina e a 100 Watts com 107 °C.

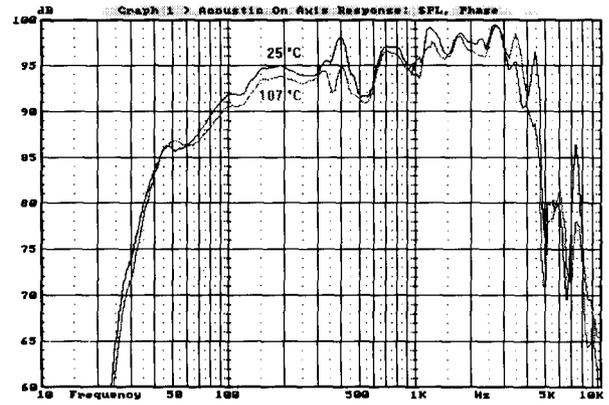


Figura 27 - Mesma situação da Fig. 26 com a curva de 100 Watts representada com -20 dB.

Na Tabela 3, vemos que a elevação da temperatura fez com que os valores de Q_{es} e Q_{ts} subissem consideravelmente (devido ao aumento de R_E); de BL diminuíssem enquanto a compliância sofria um ligeiro acréscimo que acreditamos teria sido maior se houvesse sido dado um maior intervalo de tempo para que um melhor equilíbrio tivesse sido alcançado.

Conclusão

Os aspectos básicos das não linearidades afetando os parâmetros dos alto-falantes através da frequência, deslocamento do cone e temperatura foram aqui abordados.

Novas experiências deverão feitas utilizando um transdutor de velocidade à LASER, para maior comodidade e precisão que, em conjunto com uma fonte de corrente CC + AC permitirão a medição de todos os parâmetros ao longo do deslocamento, e não apenas a Frequência de Ressonância.

Englobar as influências da frequência e do deslocamento do cone nos parâmetros do alto-falante é algo extremamente desejável e que necessita ser feito.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Neville Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes", partes I e II, J. Audio Eng. Soc., vol. 19, No 5/6, Jun/Jul 71.
- 2 - Richard H. Small, Tese para o grau de Doutor em Filosofia, apresentada na Universidade de Sidney, Austrália, em maio de 1972.
- 3 - Andrzej Dobrucki, "Nontypical Effects in Electrodynamic Loudspeaker with a Nonhomogeneous Magnetic Field in the Air Gap and Nonlinear Suspensions", J. Audio Eng. Soc., vol. 42, No 7/8, Jul/Ago 94.
- 4 - David Clark, "Precision Measurement of Loudspeaker Parameters" presented at the 99th Convention of the Audio Eng. Soc., 6-9 Out. /95.
- 5 - Jonathan Scott and Jonathan Kelly, "New Method of Characterizing Driver Linearity", J. Audio Eng. Soc., vol 44, No 4, Abril 96.
- 6 - Irina Aldoshina, e outros, "Loudspeaker Motor Nonlinear Modeling Based on Calculated Magnetic Field Inside the Gap", presented at the 97th Convention of the Audio Eng. Soc., 10-13 Nov. 94.
- 7 - Homero Sette Silva, "Análise e Síntese de Alto-Falantes e Caixas Acústicas pelo Método de T-S", H. Sheldon Serviços de Marketing Ltda., Outono de 96 - Primeira Impressão.
- 8 - Ferrofluidics Corp, Technology Division, "Step By Step Procedure for Measurement of Loudspeaker Voice Coil Operating Temperature in Real-Time", 1992.

Agradecimentos

À ELETRÔNICA SELENIUM, pelo patrocínio que tornou possível a elaboração do presente trabalho, à qual o Autor exime de quaisquer responsabilidades quanto às informações aqui veiculadas, de inteira responsabilidade do Autor, que as considera corretas, salvo lapso ou engano.

Ao pessoal técnico da SELENIUM que, de diferentes formas, participou deste trabalho com empenho, boa vontade e profissionalismo: Adão Santos, André Cruz, Elias Cunha, Paulo Thesche, Tadeslau Souza e aos estagiários Adriano Jacob e Gustavo Bohn.

À ATTACK DO BRASIL, nas pessoas de José L. Vendrametto e Rosalfonso Bortoni pelo apoio prestado.

Revisão: 14/10/96