

MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS THIELE-SMALL DE ALTO-FALANTES, COM DIFERENTES INSTRUMENTOS

HOMERO SETTE SILVA e LEONEL POLTOSI
ELETRÔNICA SELENIUM S. A

www.selenium.com.br

Os parâmetros T-S de alto-falantes podem, atualmente, ser medidos com uma grande variedade de métodos e diferentes instrumentos. Quando isso é feito com um mesmo falante, os resultados obtidos costumam diferir entre si. Este trabalho demonstra este fato e procura explicar as razões deste comportamento.

Introdução

A medição dos parâmetros T-S de um mesmo alto-falante, feita com diferentes instrumentos, pode ser algo frustrante e embaraçoso para o experimentador quando resultados significativamente diferentes são obtidos, o que não é raro.

Quando isso ocorre, depois de feita uma segunda medição surge a Interrogação: qual dos resultados é o correto ?

Antes de tentarmos responder a esta pergunta, vamos analisar os resultados obtidos a partir de dois falantes, usados como exemplo, sendo um deles de Qts alto (superior a 0,4) e outro de Qts baixo (inferior a 0,4) mas não sem antes fazermos uma breve revisão dos conceitos e da metodologia envolvidos no processo.

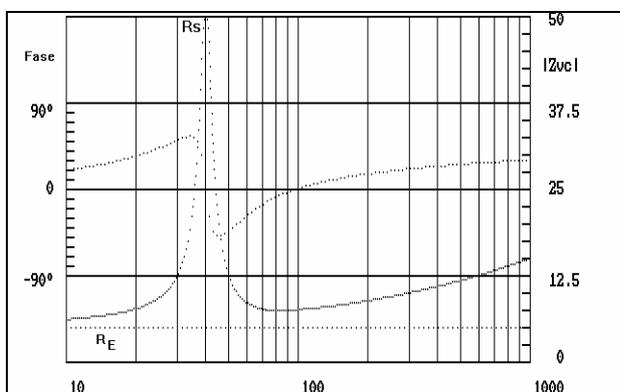


Fig. 1 - Impedância e Fase na bobina de um alto-falante.

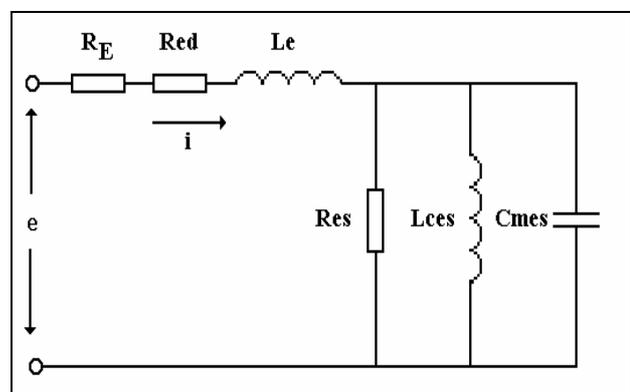


Fig. 2 - Circuito Equivalente de um alto falante visto pela bobina.

Fundamentos

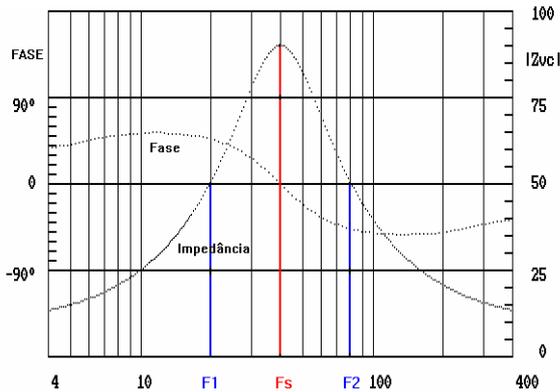


Figura 3 - Freqüências F1, F2 e Fs usadas para a determinação dos fatores de qualidade Qms, Qes e Qts.

Quando Neville Thiele ⁽¹⁾ apresentou seu método para análise e síntese do refletor de raives, e que foi depois continuado e estendido pelos trabalhos de Richard H. Small ⁽²⁾, ficou clara a necessidade de se conhecer os parâmetros Fs, Vas, e Qts. Para isso, métodos de medição foram apresentados, utilizando os pontos notáveis da curva da impedância da bobina do falante, ao ar livre e instalado em caixas acústicas, que poderiam ser fechadas ou com duto .

Na Fig. 1 vemos as curvas de impedância e de fase típicas de um falante eletrodinâmico, e que correspondem ao circuito equivalente do mesmo, visto pelos terminais da bobina móvel, cujo circuito equivalente está mostrado no Fig. 2 .

No método originalmente proposto por Thiele e Small, o Fator de Qualidade Mecânico, Qms, seria determinado através de duas freqüências F₁ e F₂, respectivamente abaixo e acima da freqüência de ressonância Fs e cuja média geométrica é igual à Fs, conforme mostra a Fig. 3. Essas freqüências F₁ e F₂ são determinadas através do cociente entre a impedância total na ressonância, Rs e da resistência ohmica da bobina, R_E.

O desenvolvimento a seguir mostra como esses valores são obtidos.

A equação (1) representa a impedância vista para dentro dos terminais da bobina do alto-falante, tendo sido normalizada em (2), onde a indutância da bobina, Le, e Red, a componente resistiva da bobina que varia com a freqüência, foram desprezadas. A equação (3) é uma forma alternativa para a representação de (2).

$$Z_{vc(s)} = R_E + R_{ed} + s \cdot L_e + 1/(1/R_{es} + 1/s \cdot L_{ces} + s \cdot C_{mes}) \quad \text{onde } s = j \cdot \omega \quad (1)$$

$$Z_{vc(s_N)} = R_E + R_{es} \cdot (s_N/Q_{ms}) / (s_N^2 + s_N/Q_{ms} + 1) \quad \text{onde } s_N = j \cdot \omega / \omega_N \quad (2)$$

$$Z_{vc(s_N)} = R_E \cdot (s_N^2 + s_N \cdot r_s/Q_{ms} + 1) / (s_N^2 + s_N/Q_{ms} + 1) \quad (3)$$

Substituindo s_N por jω_N em (2) e (3), vem :

$$Z_{vc(s_N)} = R_E + R_{es} / [1 + j \cdot Q_{ms}(\omega_N - 1/\omega_N)] \quad (4)$$

$$Z_{vc(s_N)} = R_E \cdot [1 - \omega_N^2 + j \cdot \omega_N \cdot r_s/Q_{ms}] / [1 - \omega_N^2 + j \cdot \omega_N/Q_{ms}] \quad (5)$$

Obtendo Qms, Qes e Qts

O valor de Qms será obtido a partir das equações anteriores, com o alto-falante ao ar livre. A primeira informação virá pesquisando-se as freqüências F1 e F2, onde suas impedâncias, dadas pela equação (4), tervo um mesmo módulo. Para isso acontecer, basta que $(\omega_{N_1} - 1 / \omega_{N_1})^2$ seja igual a $(\omega_{N_2} - 1 / \omega_{N_2})^2$.

Quadro 1 - Constantes Físicas

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

T = Temperatura do Ar em Graus Celcius

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

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

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

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

(Pres. Atm. P em: Pascal = Newton/m², mili 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 :

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

Quadro 2 - Parâmetros Convencionais

$$C_m = \text{Compliância Mecânica} = \text{Deslocamento/Fôrça} \text{ [Metro/Newton]}$$
$$= \text{Deslocamento} / 9,81 \cdot \text{Massa} \quad \text{[s}^2 \text{/Kg]}$$

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

C_{ms} = Compliância Mecânica da Suspensão [Metro/Newton]

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

R_{as} = resistência Acústica devido às perdas na Suspensão

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

S_d = Área Efetiva do Diafragma [Metro²]

M_{ms} = Massa Mecânica do diafragma [Kg]

M_{as} = Massa Acústica do Diafragma = M_{ms}/S_d² [Kg/Metro⁴]

βL = Densidade de Fluxo X Comprimento Efetivo da Bobina [T · m]

R_E = Resistência da bobina [ohms]

Quadro 3 - Parâmetros de THIELE-SMALL

Fs = frequência de Ressonância = $1 / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}$ [Hz]

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

Vas = Volume de ar com uma compliância igual a Cas o que implica em $C_{as} / C_{ab} = V_{as} / V_b = \alpha$

Qes = Fator de Qualidade Elétrico = $\sqrt{M_{ms} / C_{ms}} \cdot R_E / (\beta L)^2$

Qms = Fator de Qualidade Mecânico = $\sqrt{M_{ms} / C_{ms}} / R_{ms}$

Qts = Fator de Qualidade Total = $\sqrt{M_{ms} / C_{ms}} / [R_{ms} + (\beta L)^2 / R_E]$

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

$Q_{ts} \simeq Q_{es}$ pois, em geral, $Q_{ms} \gg Q_{es}$

$n_o =$ rendimento ou eficiência de referência

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

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

Quadro 4 - Parâmetros Usados na Medição dos Parâmetros

Cmes = Capacitância devida à massa móvel do falante, Mms

Lces = Indutância devida à compliância do falante, Cms

Res = resistência devida às perdas na suspensão, Rms

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

$$Q_{ms} = 2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot C_{mes} \cdot R_{es} = 2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot M_{ms} / R_{ms}$$

F1, F2 = freqüências onde a impedância tem o mesmo módulo, simétricas à Fs em uma escala logarítmica: $F_s = \sqrt{F_1 \cdot F_2}$

Es = Tensão aplicada na bobina, na freqüência Fs

E₁₂ = Tensão presente na bobina, nas freqüências F₁ e F₂

R_E = resistência ohmica da bobina

Red = Resistência dependente da freqüência

Rs = R_E + Res = Impedâncias na Freq. de ressonância Fs

rs = Rs / R_E = Impedância na ressonância, normalizada

R₁₂ = Módulo da impedância nas freqüências F₁ e F₂

Desenvolvendo os quadrados e fazendo as substituições indicadas em (6), chegaremos a (7), que nos diz ser a média geométrica das frequências F_1 e F_2 igual a F_s .

$$\omega_{N_1} = \omega_1 / \omega_s \quad ; \quad \omega_{N_2} = \omega_2 / \omega_s \quad (6)$$

$$F_s = \sqrt{F_1 \cdot F_2} \quad (7)$$

Partindo do módulo da equação (5), ao quadrado, e utilizando as relações definidas em (6), e impondo novamente, a condição de impedâncias com o mesmo módulo, em F_1 e F_2 , conforme definido em (8), chegaremos a (9), de onde obteremos a expressão de Q_{ms} , dada por (10).

$$(8) \quad \left| Z_{vc(j\omega_{N_1})} \right| = R_1 \quad ; \quad \left| Z_{vc(j\omega_{N_2})} \right| = R_2 = R_{12}$$

$$\left(\frac{R_{12}}{R_E} \right)^2 = \frac{1 + \frac{\omega_s^2}{(\omega_2 - \omega_1)^2} \cdot \frac{rs^2}{Q_{ms}^2}}{1 + \frac{\omega_s^2}{(\omega_2 - \omega_1)^2} \cdot \frac{1}{Q_{ms}^2}} \quad (9)$$

$$Q_{ms} = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \sqrt{\frac{R_s^2 - R_{12}^2}{R_{12}^2 - R_E^2}} \quad (10)$$

Como R_{12} é o módulo da impedância da bobina nas frequências F_1 e F_2 , tais que $F_s = \sqrt{F_1 \cdot F_2}$ e devido ao fato de que uma infinidade de valores F_1 e F_2 podem ter F_s como média geométrica, a solução não é única, o que nos obriga a definir um critério adicional para especificar R_{12} .

A seguir, vamos analisar algumas possibilidades.

A Solução de Thiele

Impondo em (10) a condição adicional dada por (11), teremos em (12) a solução proposta por Thiele, que fundamentou sua escolha alegando que tais pontos, estando próximos da região mais inclinada da curva, permitiria a medição de F_1 e F_2 com maior precisão.

$$R_{12} = \sqrt{R_E \cdot R_s} \quad (11)$$

$$Q_{ms} = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \sqrt{\frac{R_s}{R_E}} \quad (12)$$

A Proposta de Colloms

Para que o valor de Q_{ms} seja função apenas de F_s e das frequências F_1 e F_2 , ou seja, $Q_{ms} = F_s / (F_2 - F_1)$, conforme sugerido por Colloms, seria necessário que a quantidade sob o radical, em (10) fosse igual a 1, o que se verifica quando a igualdade (13) for satisfeita.

$$R_{12}^2 = \frac{R_E^2 + R_s^2}{2} \quad (13)$$

Desse modo, as frequências F_1 e F_2 não podem ser simplesmente tomadas nos pontos de -3 dB, conforme propôs Colloms, mas naqueles onde a impedância satisfaz a equação (13).

No entanto, se R_s for muito maior que R_E (o que pode perfeitamente acontecer) a equação (13) se reduz, aproximadamente, a $R_{12} = 0,707 \cdot R_s$, que seria a localização dos pontos de meia potência, ou -3dB, indicada por Colloms.

Pontos de 3 e 6 dB

A desvantagem das duas soluções anteriormente propostas é que, para cada alto-falante a ser testado, as frequências F_1 e F_2 estarão localizadas em pontos diferentes da curva da impedância, pois dependem de R_E e R_s , precisando ser calculados.

Esse inconveniente poderá ser evitado, sem necessidade de nenhuma aproximação, se escolhermos $R_{12}^2 = R_s / 2$, ou seja, $R_{12} = 0,707 \cdot R_s$, que corresponde a 3 dB abaixo de R_s , e fará com que a equação (10) se transforme em (14).

$$Q_{ms} = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \cdot \left(\frac{R_E}{R_s}\right)^2}} \quad (\text{a - 3 dB}) \quad (14)$$

$$Q_{ms} = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3} - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{R_E}{R_s}\right)^2}} \quad (\text{a - 6 dB}) \quad (14b)$$

As possibilidades acima discutidas estão resumidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Alternativas Para a Medição de Qms, Qes e Qts			
R_{12}	E_{12} I_{12}	Qms	Método
$\sqrt{R_E \cdot R_S}$	$R_{12} \cdot I$ E/R_{12}	$Q_{ms} = \frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \sqrt{\frac{R_S}{R_E}}$	THIELE
$\sqrt{\frac{R_E^2 + R_S^2}{2}}$	$E_s / \sqrt{2}$ $I_s \cdot \sqrt{2}$	$\frac{F_s}{F_2 - F_1}$	COLLOMS (exato)
$\frac{R_s}{\sqrt{2}}$	$E_s \cdot \sqrt{2}$ $I_s \cdot \sqrt{2}$	$\frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \cdot \left(\frac{R_E}{R_S}\right)^2}}$	-3 dB
$\frac{R_s}{2}$	$E_s / 2$ $2 \cdot I_s$	$\frac{F_s}{F_2 - F_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3} - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{R_E}{R_S}\right)^2}}$	-6 dB
$Q_{es} = Q_{ms} / (R_s / R_E - 1)$ $Q_{ts} = Q_{ms} \cdot (R_E / R_s) = 1 / (1 / Q_{ms} + 1 / Q_{es})$			Todos

Uma vez medida a frequência de ressonância F_s , e escolhida a definição para a localização de F_1 e F_2 , resta saber que tipo de fonte de sinal usada, se de tensão ou corrente. Vamos analisar essas duas possibilidades:

a) Fonte de Tensão E_s (geralmente 1 V eficaz, senoidal):

meça a corrente na ressonância, I_s , e localize F_1 e F_2 nos pontos onde a corrente vale $1,414 \cdot I_s$.

b) Fonte de Corrente I_s , senoidal):

meça a tensão na ressonância, E_s , e localize F_1 e F_2 nos pontos onde a tensão vale $0,707 \cdot E_s$.

c) em ambos os caso, $R_s = E_s / I_s$

Em um procedimento análogo, poderíamos determinar F_1 e F_2 em pontos diferindo de 6 dB em relação ao nível em F_s , conforme mostra o Quadro 2, que resume todos os casos discutidos.

Nesse quadro, a coluna E_{12} deve ser utilizada no caso de uma fonte de corrente constante igual a I , sendo a coluna I_{12} para uso com fonte de tensão.

QUADRO 6 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS			
Fabricante	Descrição	Circuito	Custo
Brüel & Kjaer	Transdutor de Velocidade a LASER mod. 8323, trabalhando em conjunto com o Analisador de Áudio mod. 2012.	Fonte de tensão constante com 1 V associada em série com um resistor de 1 ohm.	US \$ 30,000.00
LinearX - LMS	LMS - placa de hardware para aquisição de dados e software de processamento, para computador padrão IBM PC.	Fonte de tensão constante com 4,36 V associada em série com um resistor de 500 ohms.	US \$ 1,200.00
PEAK INSTRUMENT	WOOFER TESTER - equipamento para conexão a computador padrão IBM PC via porta serial. Pequenas dimensões e baixo custo. Distribuído pela PARTS EXPRESS.	Fonte de corrente constante com 5 mA.	US \$ 150.00
RB ELETRÔNICA ATTACK	ATS - equipamento de bancada, para uso manual, acompanhado de software auxiliar.	Fonte de corrente constante com 50 mA.	US \$ 600.00

A partir de Q_{ms} , os valores de Q_{es} e Q_{ts} poderão ser calculados através das equações (15) e (16), válidas para qualquer uma das opções.

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{\frac{R_s}{R_E} - 1} \quad (15)$$

$$Q_{ts} = Q_{ms} \cdot \frac{R_E}{R_s} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{ms}} + \frac{1}{Q_{es}}} \quad (16)$$

Medindo os Parâmetros

As experiências relatadas no presente trabalho, foram elaboradas a partir de dois alto-falantes: um com Qts alto (superior a 0,4), denominado A, e outro, de Qts baixo (inferior a 0,4), denominado B.

As duas amostras foram medidas, nas mesmas condições ambientais (temperatura 26 °C, umidade relativa do ar 60% e pressão atmosférica 1003 mB) utilizando-se os equipamentos descritos no Quadro 6. Esses equipamentos variaram largamente em preço, indo desde o transdutor de velocidade a laser, da Brüel, que foi utilizado como padrão de comparação, até o prático e barato Woofer Tester, da Peak Instrument, passando pelo ATS, projetado por um dos Autores do presente trabalho e industrializado pelo Eng. Rosalfonso Bortoni, inicialmente na RB Eletrônica, de Santa Rita do Sapucaí e, posteriormente, pela ATTACK.

Os Quadros 7 e 8 mostram os resultados das medidas, para os falantes A e B, respectivamente. Nesses quadros, foram acrescentadas duas colunas, denominadas LMS-B e LEAP-B, onde os programas LMS e LEAP, respectivamente, processam os dados da curva da impedância, fornecida pelo Brüel, daí obtendo os parâmetros procurados.

Os Quadros 9 e 10 mostram as variações relativas de cada parâmetro, em relação aos valores fornecidos pelo Brüel, para os falantes A e B, respectivamente e, para facilitar mais ainda a interpretação dos resultados, essas variações relativas estão mostradas, sob a forma de barras, nos gráficos da Fig. 5 .

Nas duas últimas colunas, respectivamente denominadas LMS-B e LEAP-B temos os resultados de um processamento da curva da impedância, fornecida pelo Brüel para cada um dos alto-falantes utilizados, e não de uma medição feita diretamente por instrumento.

Na ultima linha dos dados apresentados nos Quadros 9 e 10 foram calculadas as médias quadráticas (raiz quadrada da média dos valores elevados ao quadrado) dos desvios de cada instrumento, em relação ao Brüel, com a finalidade de termos um critério simples que permitisse a avaliação dos dados coletados. Nas Figs. 6 e 7 podemos ver uma representação em barras dessas quantidades.

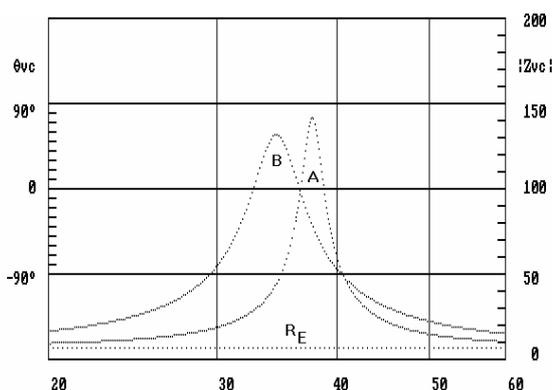


Fig. 4 - Curvas de Impedância dos Falantes A e B .

Comentando os Resultados

Qts alto x Qts baixo

Observando as Figs. 7 e 8 podemos constatar que as variações entre os parâmetros medidos foram significativamente maiores para o falante A, de Qts elevado.

Podemos notar, também, que depois do Brüel, a melhor média foi sempre obtida pelo LEAP, processando a curva de impedância fornecida pelo Brüel, tendo sido o desempenho do LMS, processando a curva de impedância do Brüel, o pior deles, no caso do falante A .

QUADRO 7 - WPU 1802

	BRÜEL	LMS	PEAK	ATS	LMS-B	LEAP-B	
R _E	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	Ohms
F _s	37,7	37,39	37,13	37,7	37,39	37,72	Hertz
V _{as}	238,38	267,73	251,04	228,3	195,82	242,21	Litros
Q _{ts}	0,85	0,664	0,9475	0,834	0,680	0,882	-
Q _{es}	0,89	0,699	1,011	0,892	0,717	0,927	-
Q _{ms}	17,42	13,315	15,104	12,909	13,315	18,068	-
SPL	94,1	94,89	92,87	93,2	93,42	93,34	dB
N _o	-	1,94	-	1,32	1,38	1,36	%
S _D	1195	1195	1195	1195	1195	1195	cm ²
β _L	16,5	17,83	15,27	16,94	20,60	16,22	T•m
C _{ms}	119,6	132,11	125,39	113,8	96,57	119,44	μm/N
M _{ms}	149,19	137,14	146,55	156,6	187,62	149,08	g
R _{ms}	2,03	* 2,42	2,264	2,89	* 3,31	* 1,96	Kg/s
* Valores Calculados							
Le @ F _s	1,4	1,587	-	-	1,507	2,932	Hy
Le @ 1 kHz	-	0,6837	0,4201	-	0,6664	0,8094	Hy
Le @ 20kHz	-	0,3172	-	-	0,3168	0,2497	Hy
Rs @ F _s	141,4	138,37	109,99	106,80	135,09	141,81	Ohms
Rs @ I _s	141,42	141,72	146,12	118,41	-	-	Ohms
I _s	7,0	6,8	5,0	50,0	-	-	mA
Red @ F _s		0,483	-	-	0,394	0,245	Ohms
Red @ 1 kHz		3,2887	-	-	3,2346	3,5332	Ohms
Red @ 20kHz		18,893	-	-	22,062	40,575	Ohms
K _{rm}		19,9693	-	-	11,9006	2,8408	mΩ
K _{xm}		6,4360	-	-	5,8440	25,0873	mHy
E _{rm}		0,5836	-	-	0,6409	0,8148	-
E _{xm}		0,7436	-	-	0,7517	0,6074	-

QUADRO 8 - WPU 1805

	BRÜEL	LMS	PEAK	ATS	LMS-B	LEAP-B	
R _E	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	Ohms
F _s	34,6	34,69	34,81	35,17	34,69	34,62	Hertz
V _{as}	332,35	309,35	343,02	328,8	333,11	330,59	Litros
Q _{ts}	0,37	0,317	0,421	0,381	0,346	0,368	-
Q _{es}	0,39	0,333	0,447	0,407	0,364	0,387	-
Q _{ms}	7,64	6,653	7,356	6,030	7,304	7,751	-
SPL	98,5	97,76	96,94	97,3	97,69	97,37	dB
N _o	-	3,75	-	3,38	3,69	3,43	%
S _D	1190	1190	1190	1190	1190	1190	cm ²
β _L	21,1	23,65	19,23	20,51	21,78	21,25	T•m
C _{ms}	166,8	153,84	172,68	165,00	165,65	164,4	μm/N
M _{ms}	127,14	136,85	121,05	124,11	127,09	128,57	g
R _{ms}	3,61	* 4,48	3,60	4,60	* 3,79	* 3,61	Kg/s
* Valores Calculados							
Le @ F _s	1,9	2,488	-	-	2,746	3,872	Hy
Le @ 1 kHz	-	1,2664	0,6717	-	1,2471	1,3970	Hy
Le @ 20kHz	-	0,6939	-	-	0,6171	0,5634	Hy
Rs @ F _s	129,30	130,97	109,01	98,76	131,53	131,33	Ohms
Rs @ I _s	127,92	128,45	134,38	102,54	-	-	Ohms
I _s	7,67	6,89	5,0	50,0	-	-	mA
Red @ F _s	-	0,576	-	-	0,427	0,296	Ohms
Red @ 1 kHz	-	4,6652	-	-	4,7992	4,2783	Ohms
Red @ 20kHz	-	30,098	-	-	41,475	46,150	Ohms
K _{rm}	-	20,1913	-	-	8,8475	4,1294	mΩ
K _{xm}	-	7,3341	-	-	9,7260	19,791	mHy
E _{rm}	-	0,6223	-	-	0,7199	0,7939	-
E _{xm}	-	0,7992	-	-	0,7651	0,6969	-

Talvez a razão dos maiores erros terem acontecido para o falante A, de Qts elevado, seja a forma da curva da impedância.

Na Fig. 4 vemos as curvas da impedância das bobinas dos falantes A e B, em torno da região da ressonância. Como podemos constatar, o falante A, de Qts elevado, apresenta um pico muito mais estreito que o outro. Este fato, somado à maior inclinação da curva, pode contribuir para aumentar consideravelmente o erro nas medidas ou durante o processamento da curva.

Resultados do LMS

O LMS permite tanto a medição direta dos parâmetros de um falante quanto pode obter esses parâmetros processando a curva da impedância fornecida por outro equipamento.

No caso do falante A, como instrumento de medida, o LMS praticamente empatou com a segunda pior média. Processando a curva de impedância fornecida pelo Brüel (LMS-B), obteve a pior de todas as médias: quase duas vezes a anterior.

Para o falante B, o LMS como instrumento de medição apresentou o pior resultado médio, tendo se saído bem processando a curva do Brüel.

Os fatores de qualidade Qts, Qes e Qms, no caso do falante A foram menores que os medidos pelo Brüel em torno de 20%. Para o falante B, esses mesmos valores foram aproximadamente 15 menores.

O LMS, para medir os parâmetros de um falante, primeiro obtém a curva da impedância do mesmo para, em seguida, processá-la.

Na Fig. 5 vemos as curvas de impedância e fase do Brüel e do LMS, que, praticamente se superpõem.

Em vista disso acreditamos poder afirmar que as discrepâncias encontradas entre os valores dos parâmetros medidos por ambos os equipamentos devem-se à maneira como o LMS processa

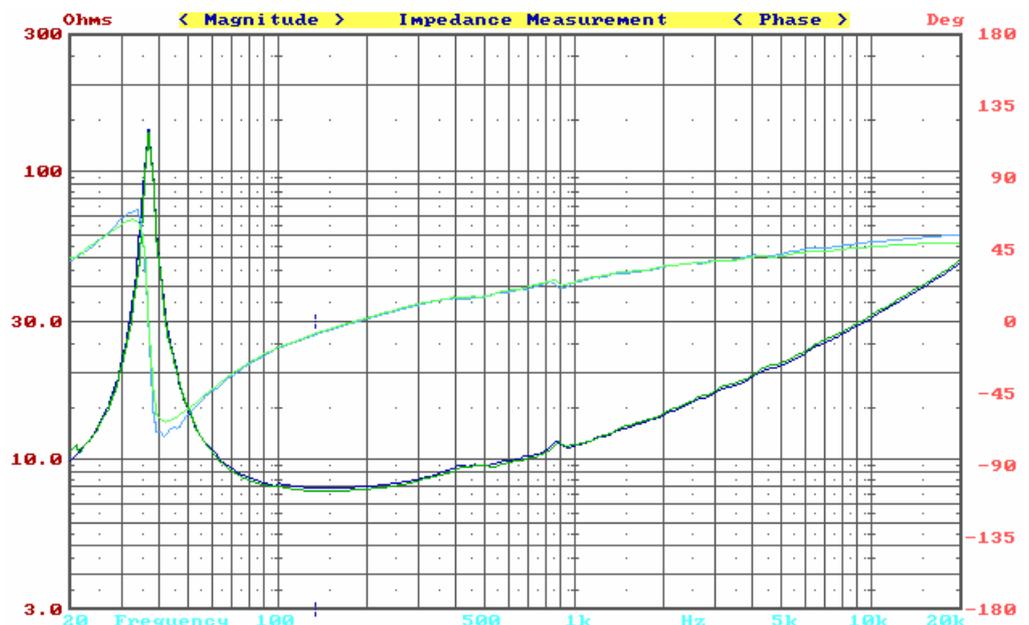


Fig. 5 - Curvas de Impedância e de fase obtidas pelo Brüel e pelo LMS.

QUADRO 9 - WPU 1802						
	LMS	PEAK	ATS	LMS-B	LEAP-B	
Variação Percentual em Relação aos Valores Obtidos com o Brüel						
R_E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	%
Fs	-0,82	-1,51	0,0	-0,82	0,05	%
Vas	12,31	5,31	-4,23	-17,85	1,61	%
Qts	-21,88	11,47	-1,88	-20,00	3,76	%
Qes	-21,46	13,60	0,22	-19,44	4,16	%
Qms	-23,56	-13,29	-25,90	-23,56	3,72	%
β_L	8,06	-7,45	2,67	24,85	-1,70	%
Cms	10,46	4,84	-4,85	-19,26	-0,13	%
Mms	-8,08	-1,77	4,97	25,76	-0,07	%
Rms	19,21	11,53	42,36	63,05	-3,45	%
Média	15,02	8,59	15,94	26,98	2,50	%

QUADRO 10 - WPU 1805						
	LMS	PEAK	ATS	LMS-B	LEAP-B	
Variação Percentual em Relação aos Valores Obtidos com o Brüel						
R_E	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	%
Fs	0,26	0,61	1,65	0,25	0,05	%
Vas	-6,92	3,21	-1,07	0,23	-0,53	%
Qts	-14,32	13,78	2,97	-6,35	-0,49	%
Qes	-16,61	14,61	4,36	-6,72	-0,87	%
Qms	-12,92	-3,72	-21,07	-4,39	1,46	%
β_L	12,09	-8,86	-2,80	3,22	0,71	%
Cms	-7,77	3,52	-1,08	-0,69	-1,44	%
Mms	7,64	-4,79	-2,38	-0,37	0,35	%
Rms	24,10	-0,28	27,42	4,99	0,0	%
Média	12,41	7,36	11,14	3,75	0,78	%

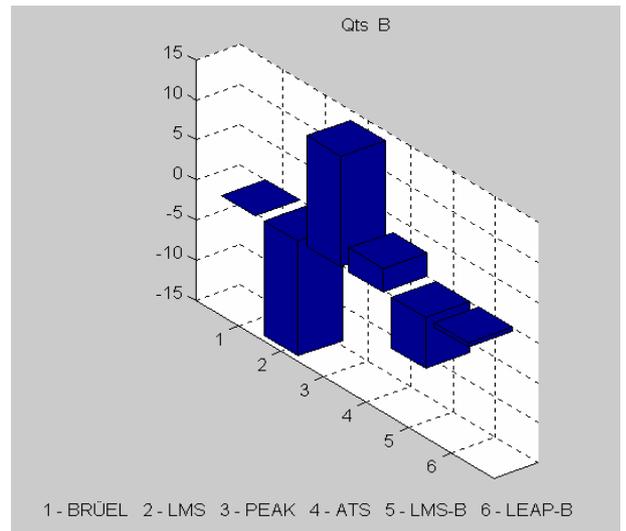
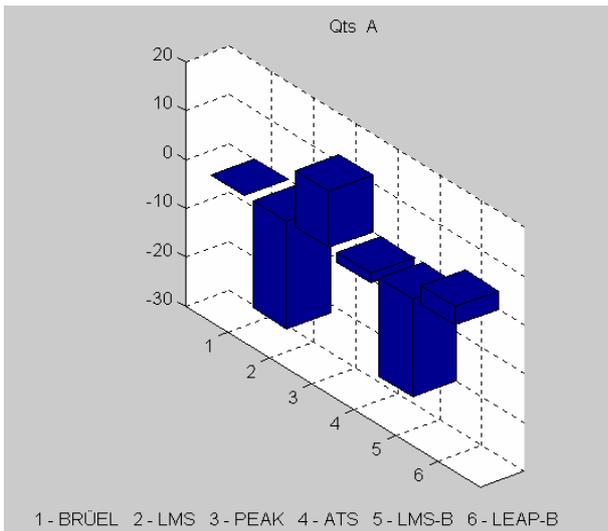
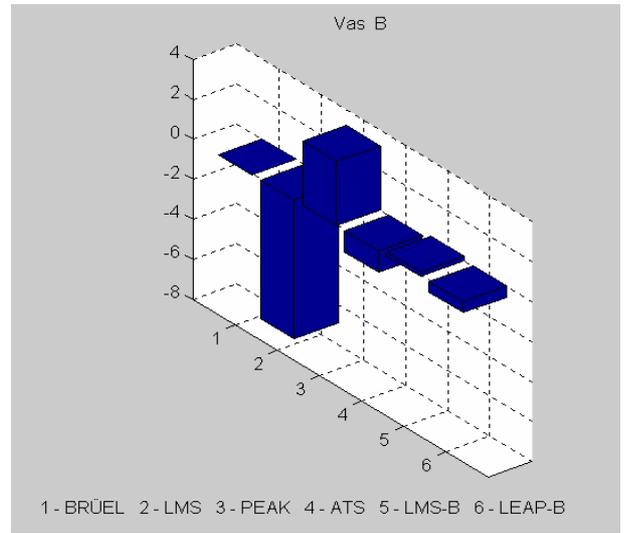
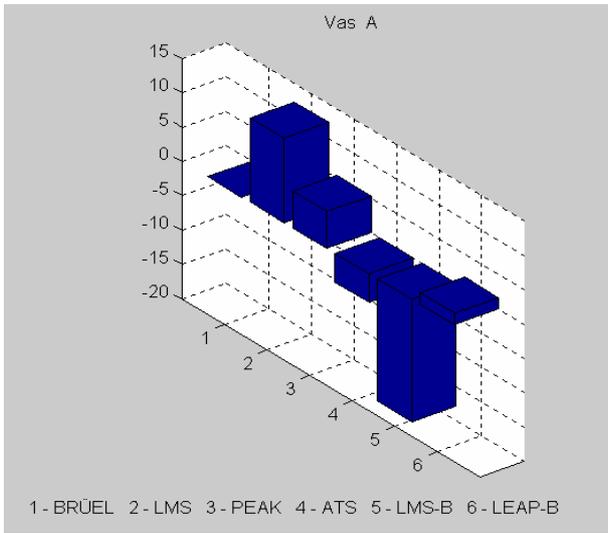
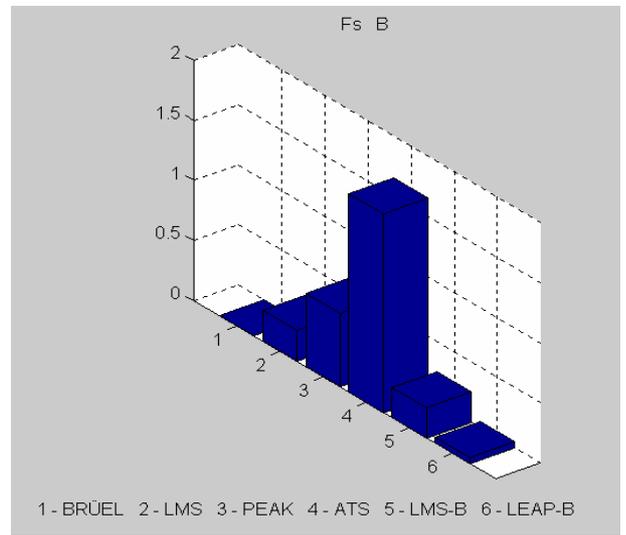
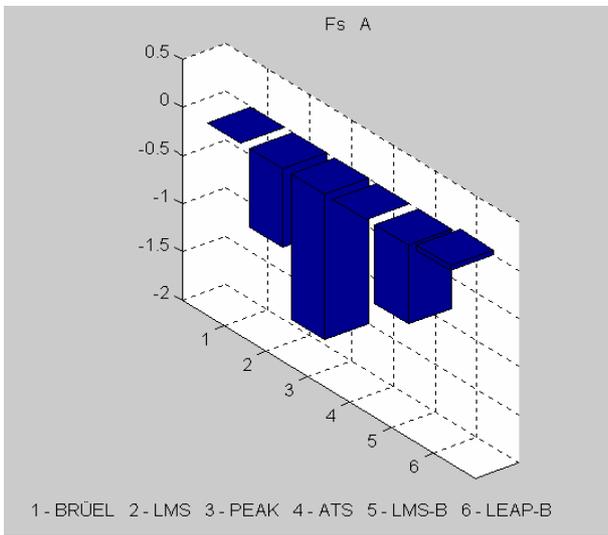


Fig. 6- Representação dos erros relativos mostrados nos Quadros 9 e 10.

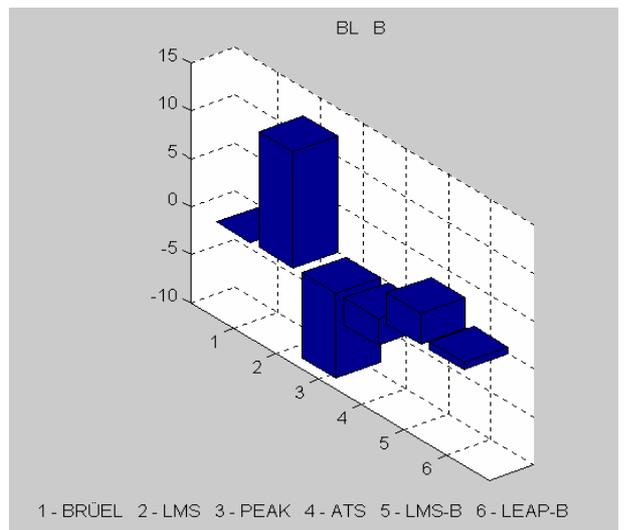
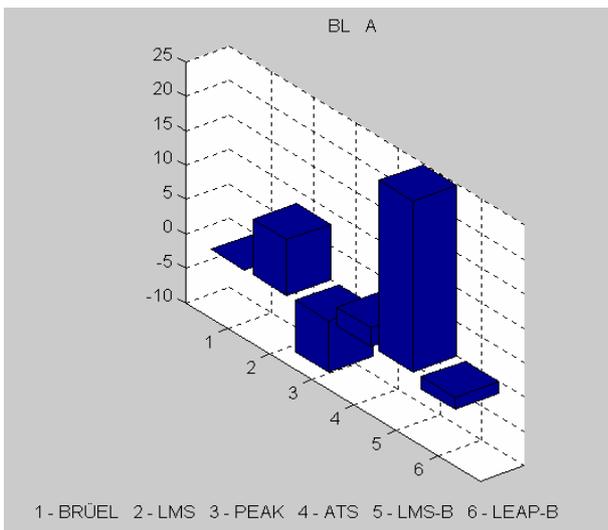
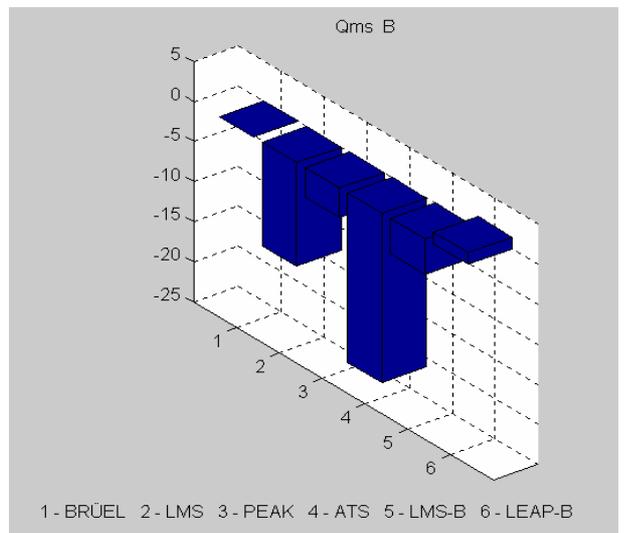
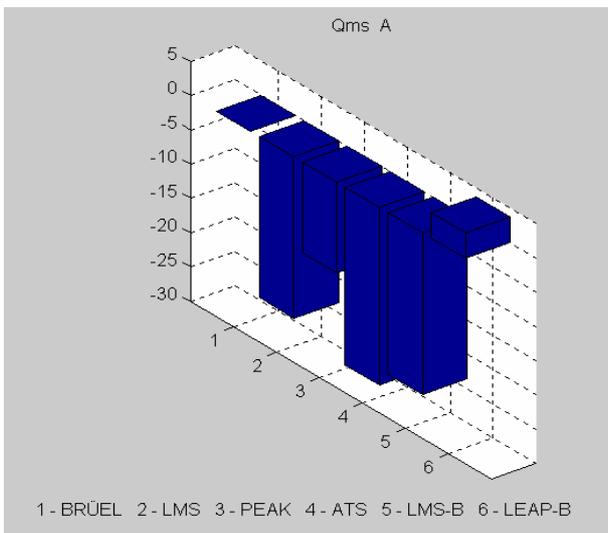
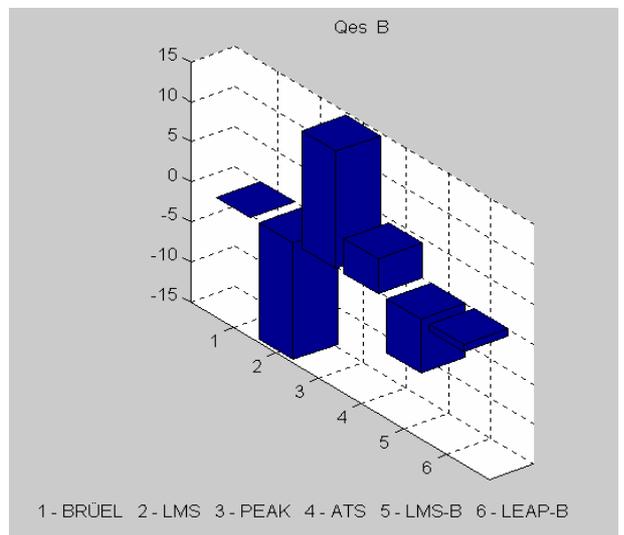
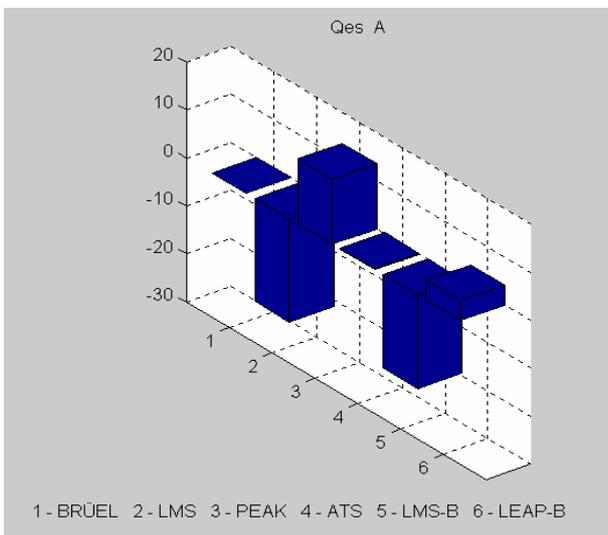


Fig. 6 - Continuação ...

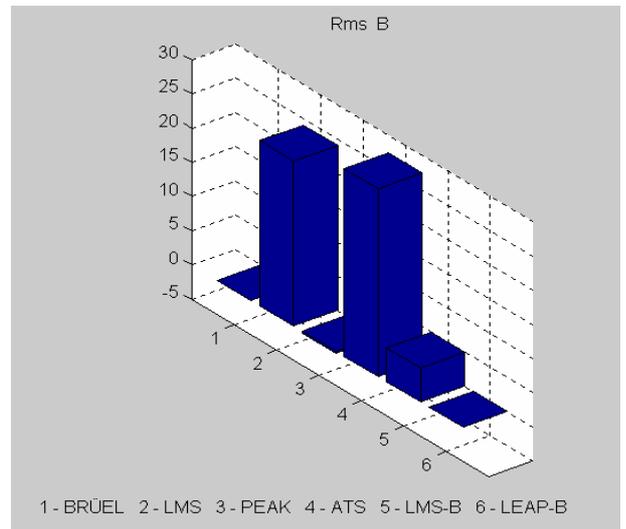
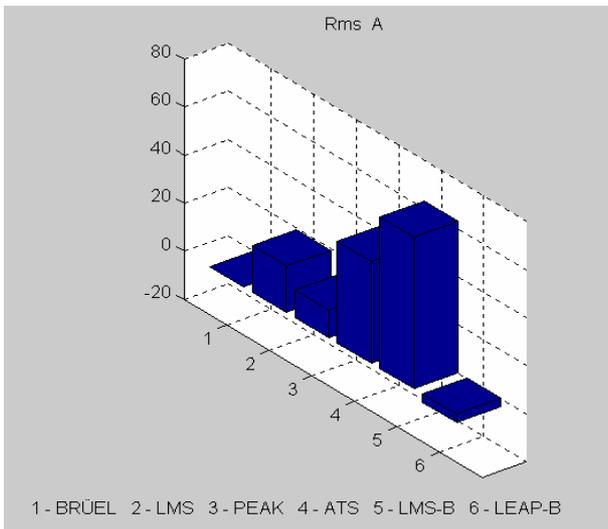
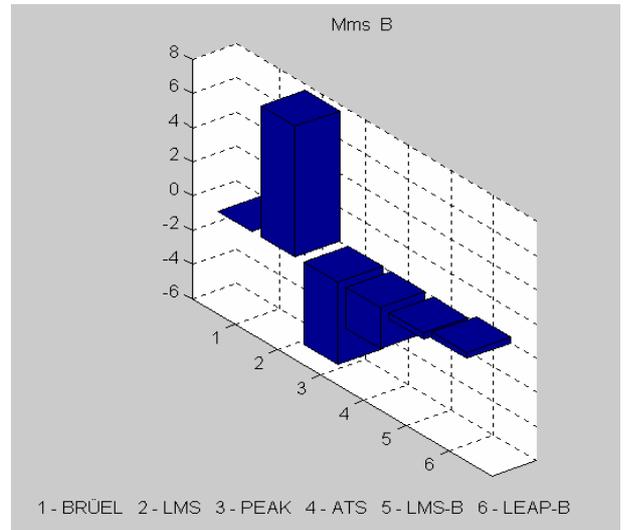
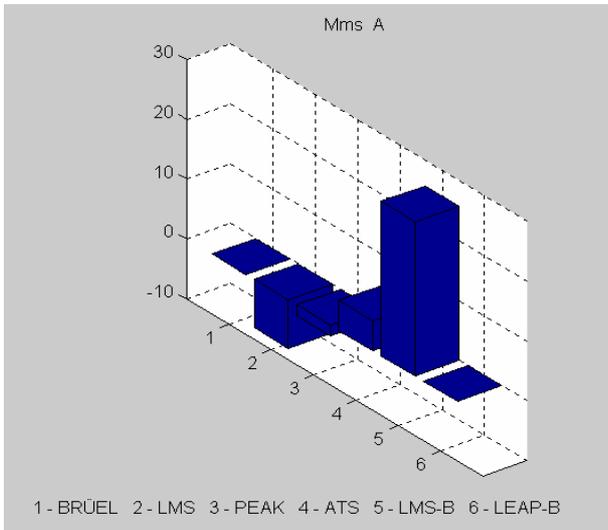
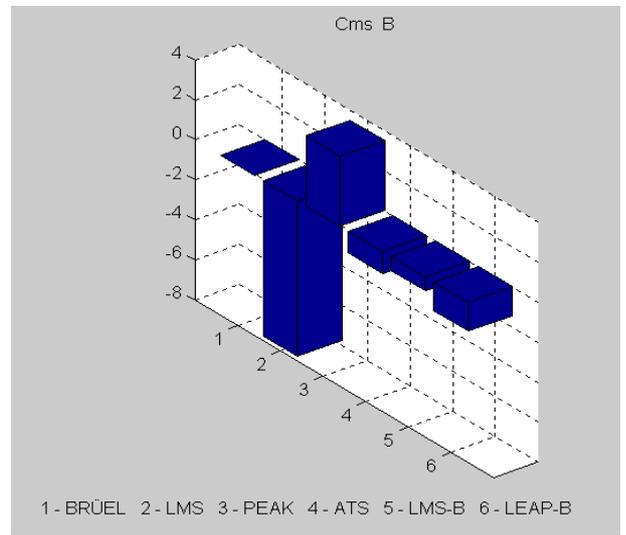
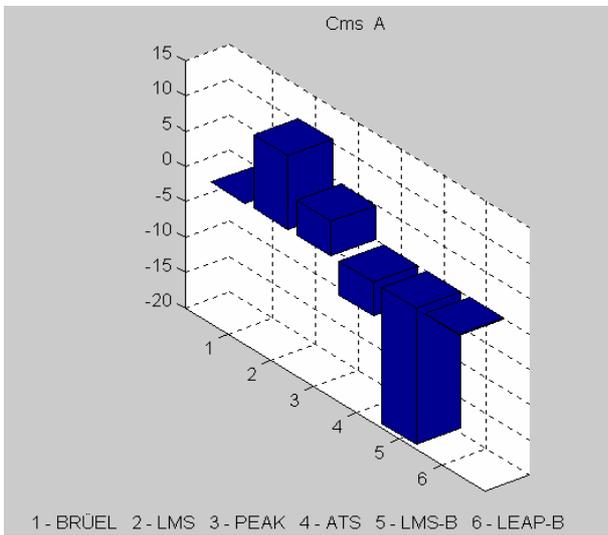


Fig. 6 - Continuação ...

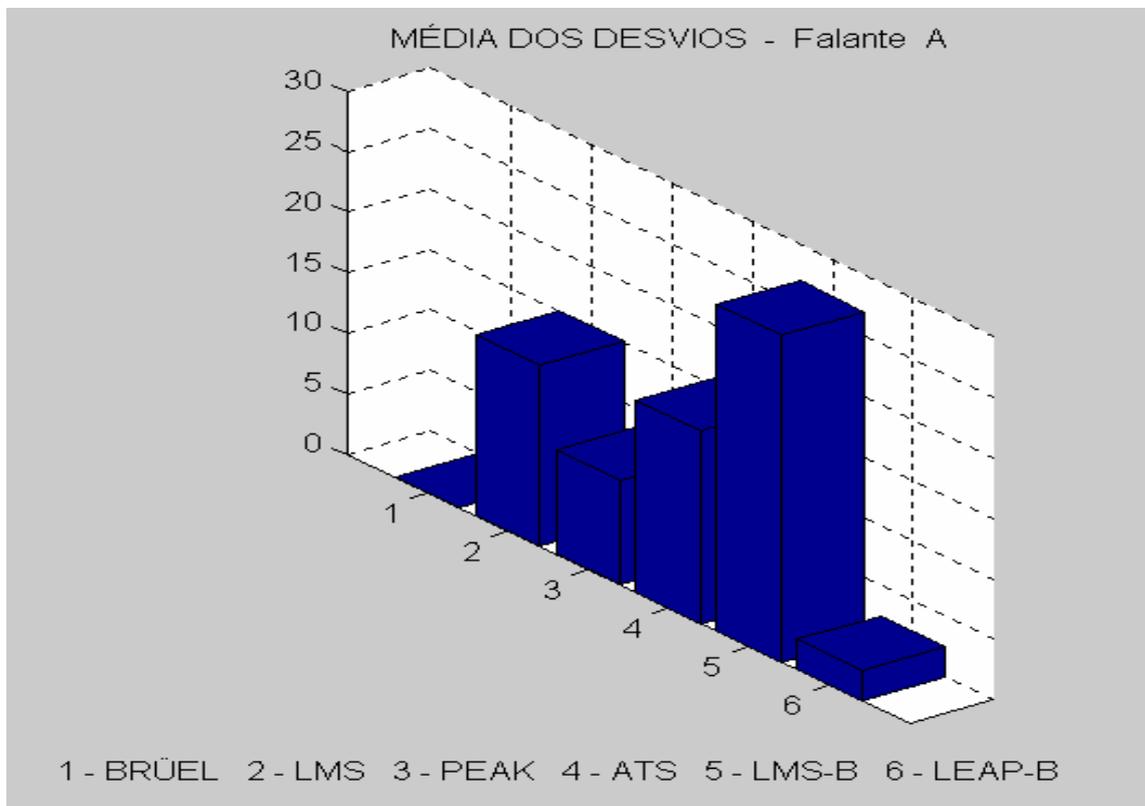


Fig. 7 - Média Quadrática dos desvios relativos ao alto-falante A

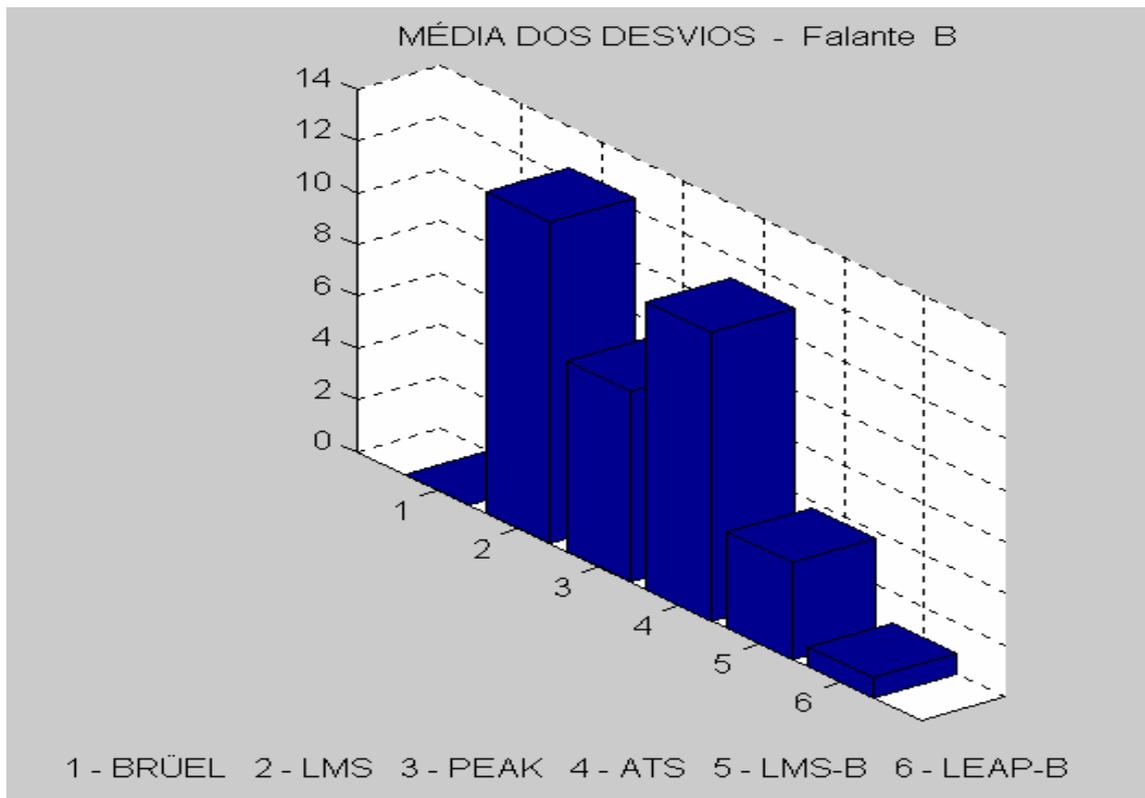


Fig. 8 - Média Quadrática dos desvios relativos ao alto-falante B

FALANTE A			FALANTE A		
FREQ	IMP	FASE	FREQ	IMP	FASE
20.2519	10.6818	39.5724	32.1775	27.618	63.3524
20.2519	10.6818	39.5724	32.5827	29.282	63.6267
20.5069	10.8238	40.2308	32.993	32.5363	63.5304
20.7651	10.9409	40.2587	33.4084	36.1522	63.4341
21.0266	11.0593	40.2865	33.8291	39.4905	62.768
21.2914	11.179	40.3144	34.2551	43.1372	62.1019
21.5595	10.8115	41.7232	34.6865	47.1205	61.4358
21.831	10.4561	43.1319	35.1233	55.849	58.452
22.1059	10.6647	42.7943	35.5656	66.1943	55.4681
22.3843	10.8775	42.4567	36.0135	82.2592	47.3085
22.6662	11.1367	44.2673	36.467	102.223	39.1489
22.9516	11.4021	46.0778	36.9262	117.513	19.3059
23.2406	11.4824	46.6839	37.3912	135.09	-0.537
23.5333	11.5632	47.29	37.862	119.1965	-14.7872
23.8296	11.7635	47.7713	38.3388	105.1729	-29.0374
24.1297	11.9674	48.2525	38.8216	92.7992	-43.2876
24.4336	12.1747	48.7338	39.3105	72.5831	-50.8061
24.7412	12.3998	49.444	39.8055	56.771	-58.3245
25.0528	12.6291	50.1542	40.3068	50.9816	-59.6295
25.3683	13.0117	51.0201	40.8143	45.7825	-60.9344
25.6877	13.4058	51.8859	41.3283	41.1137	-62.2394
26.0112	13.7464	52.6429	41.8487	36.11	-62.4914
26.3388	14.0957	53.3998	42.3757	31.7153	-62.7434
26.6704	14.3699	53.9368	42.9093	28.9802	-62.4068
27.0063	14.6494	54.4739	43.4497	26.481	-62.0701
27.3464	14.9343	55.0109	43.9968	25.2121	-61.6122
27.6907	15.478	55.8145	44.5509	24.004	-61.1543
28.0394	16.0415	56.6181	45.1119	22.8538	-60.6964
28.3925	16.586	57.2881	45.68	21.592	-60.103
28.7501	17.149	57.958	46.2552	20.3999	-59.5095
29.1121	17.7311	58.628	46.8377	19.3548	-58.7935
29.4787	18.7823	59.4998	47.4275	18.3632	-58.0774
29.8499	19.8959	60.3715	48.0247	17.6082	-57.3983
30.2258	20.8224	60.999	48.6295	16.8842	-56.7192
30.6064	21.7921	61.6265	49.2419	16.2313	-55.9497
30.9918	23.1386	62.2151	49.8619	15.6036	-55.1801
31.3821	24.5683	62.8037	50.4898	15.1878	-54.5886
31.7773	26.0486	63.078			

Tabela 1 - Listagem das curvas de Impedância e Fase do falante A, produzida pelo LMS

tais informações, já que ambos mediram praticamente a mesma curva de impedância.

Outro argumento favorável a esta idéia seria que o LEAP, ao processar as curvas do Brüel produziu sempre as melhores médias, tanto para o falante A quanto para o B.

Na Tabela 1, temos a listagem produzida pelo LMS, reduzida à faixa de interesse para a determinação dos parâmetros T-S. Utilizando esses valores, podemos calcular os valores desses parâmetros “manualmente”:

$F_s = 37,39$; $R_s = 135,09$ (Tabela 1, ponto de impedância máxima)

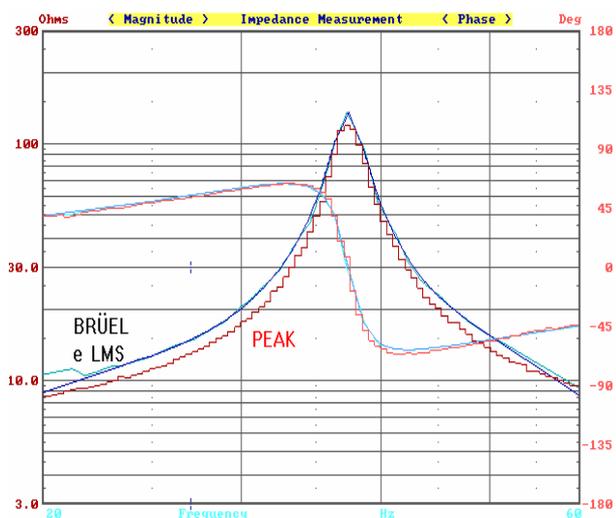
$$R_{12} = (6,9 \times 135,09)^{1/2} = 30,5307$$

$$F_1 = 32,5827 \quad ; \quad F_2 = 42,3757 \quad (\text{Tabela 1, sem interpolação})$$

$$Q_{ms} = (37,39 / (42,3757 - 32,5827)) / (135,09 / 6,9)^{1/2} = 16,89$$

Comparando com o valor de Q_{ms} fornecido pelo Quadro 7, para o Brüel (17,42), vemos que o valor acima obtido foi o mais próximo de todos, incluindo aquele fornecido pelo processamento do LEAP.

Tudo leva a crer que o problema evidenciado pelo LMS nada tem a ver com a aquisição de dados (curva da impedância), mas com o processamento matemático para obtenção dos parâmetros.



Resultados do PEAK

O menor e o mais barato de todos os instrumentos de medição (não de processamento) utilizados neste trabalho foi o que apresentou o menor desvio médio em relação ao Brüel.

Na Fig. 9 vemos as curvas de impedância e de fase do falante A, obtidas com o Brüel e o LMS, que praticamente se superpõem, e as obtidas com o PEAK, onde a da impedância difere das demais. A faixa de frequência foi propositalmente reduzida para melhor observação da região em torno da frequência de ressonância.

Fig. 9 - Curvas de Impedância e de Fase obtidas com o BRÜEL, o LMS e o PEAK.

Resultados do ATS

O ATS - Analisador Thiele Small - , é um instrumento de bancada, para operação manual, que não se comunica diretamente com o computador, mas faz uso de um programa auxiliar onde o usuário é a "interface".

O desvio médio do ATS foi extremamente prejudicado pelos elevados erros na determinação do Q_{ms} e, por conseguinte de R_{ms} . Excetuados esses dois parâmetros, foram os resultados do ATS os que mais se aproximaram do Brüel.

O valor de Q_{ms} , utilizando-se o método proposto por Thiele, é dado pela equação (12) e depende do cociente R_s/R_E . Os valores de R_s obtidos com fonte de corrente (PEAK e ATS) foram menores que os fornecidos pelos instrumentos tipo fonte de tensão.

Já o valor de Q_{ts} , como depende do cociente Q_{ms}/R_s , é pouco afetado pois tanto Q_{ms} quanto R_s tinham valores menores que os esperados, ficando o cociente entre eles pouco alterado e, por conseguinte, o valor de Q_{ts} . O mesmo se aplica quanto ao valor de Q_{es} .

Foi observado durante as experiências, que a medição da impedância R_s , na ressonância, utilizando-se o ATS (fonte de corrente) apresentou, em alguns falantes, um valor significativamente menor que o produzido com fonte de tensão. Nesses casos, utilizando-se a saída de corrente fornecida pelo ATS (uma tensão diretamente proporcional à corrente) observou-se, em um osciloscópio, que a onda de corrente estava acentuadamente distorcida nos picos (as partes mais altas dos picos positivos e negativos apareciam invertidas, como em um espelho), mas apenas na frequência de ressonância. Uma alteração de menos de 1 Hz para cima ou para baixo da ressonância fazia desaparecer o problema.

Este fato sugere a presença de um comportamento não linear no alto-falante, o que poderia ser uma característica do mesmo ou defeito de fabricação.

Resultados por Processamento

Os programas LEAP e LMS podem fornecer os parâmetros T-S a partir de uma curva de impedância importada.

O processamento feito pelo LEAP, na curva de impedância do Brüel foi bom apenas para o falante B (Qts baixo). Já o LEAP obteve sempre os melhores resultados de todo o conjunto quando fez este processamento.

Como as curvas de impedância obtidas pelo Brüel e pelo LMS são praticamente as mesmas isto significa que o LEAP, processando as curvas de impedância obtidas com o LMS, fornecerá um resultado muito melhor que o conseguido com o LMS.

Variação de Res

A impedância de um alto-falante na ressonância, R_s , é puramente resistiva e dada pela soma das parcelas R_E , R_{ed} e R_{es} , ou seja: a componente ohmica da bobina, a componente resistiva da bobina que depende da frequência e a reflexão da resistência mecânica R_{ms} , para o lado elétrico e que representa as perdas na suspensão.

A componente R_{ed} , que pode ser obtida para os dois falantes nos Quadros 7 e 8, coluna LEAP-B foi menor que 0,3 ohms, nos dois casos.

Assim, as variações de R_s , observadas nos Quadros 11 e 12, em função da corrente na bobina, serão atribuídas ao comportamento não linear de R_{ms} , ou seja, R_{es} no lado elétrico.

Nas Figs. 10 e 11 podemos notar que a tensão e a corrente aplicadas nas bobinas dos dois falantes não segue a lei de ohm.

Por sua vez, as Figs. 14 e 15 indicam a grande variação da resistência na ressonância R_s , com a corrente aplicada, inclusive no intervalo que vai de 5 mA (corrente do PEAK) até 50 mA (corrente do ATS).

As Figs. 12 e 13 mostram uma variação relativamente pequena da Frequência de Ressonância, F_s , com a corrente, o que se deve à alteração da compliância mecânica C_{ms} , com o deslocamento do cone.

A variação de R_{es} com a corrente produzirá diferenças significativas nos valores de Q_{ms} e R_{ms} , obtidos com equipamentos que excitam o falante com diferentes correntes.

Bibliografia

- 1 - Análise e Síntese de Alto-Falantes e Caixas Acústicas
Homero Sette Silva
H. Sheldon Serviços de Marketing Ltda.
- 2 - O Alto-Falante em Regime de Grandes Sinais
Homero Sette Silva
Apresentado no I Congresso AES Brasil, em 1996
- 3 - Manuais do Brüel, LMS, PEAK, ATS e LEAP

QUADRO 11 - FALANTE A			
Es (Volts)	Is (mA)	Fs (Hz)	Rs (Ohms)
0,180	1,0	38,21	180,30
0,395	2,5	37,96	157,92
0,741	5,0	37,80	148,18
1,392	10,0	37,58	139,23
2,027	15,0	37,58	135,12
2,621	20,0	37,54	131,07
3,162	25,0	37,96	126,48
3,788	30,0	37,95	126,26
4,849	40,0	38,22	121,23
5,920	50,0	38,47	118,40
6,881	60,2	38,85	114,30
8,147	74,9	39,33	108,77
10,102	99,9	40,21	101,12

QUADRO 12 - FALANTE B			
Es (Volts)	Is (mA)	Fs (Hz)	Rs (Ohms)
0,1595	1,0	34,66	159,5
0,3479	2,5	34,63	139,16
0,6719	5,0	34,70	134,38
1,2740	10,0	34,19	127,40
1,8596	14,9	34,56	124,80
2,4233	20,0	34,62	121,16
2,9065	25,0	34,53	116,26
3,412	30,0	34,56	113,73
4,319	40,0	34,68	107,98
5,127	50,0	34,70	102,54
5,881	60,0	35,05	98,02
6,980	75,0	35,27	93,07
8,682	100,0	35,47	86,82

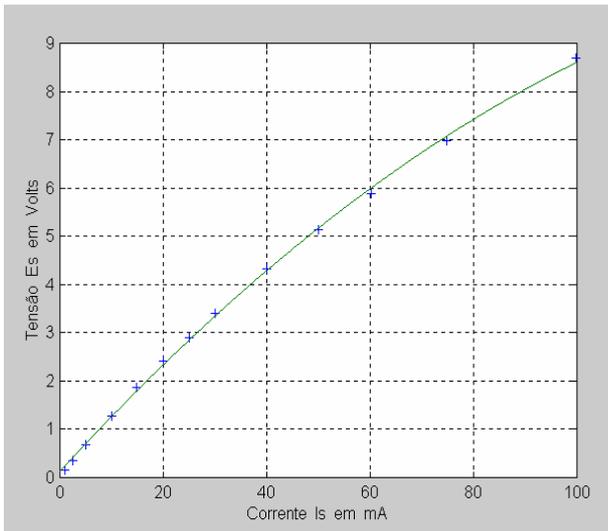


Fig. 10 - Tensão x Corrente na bobina do falante B.

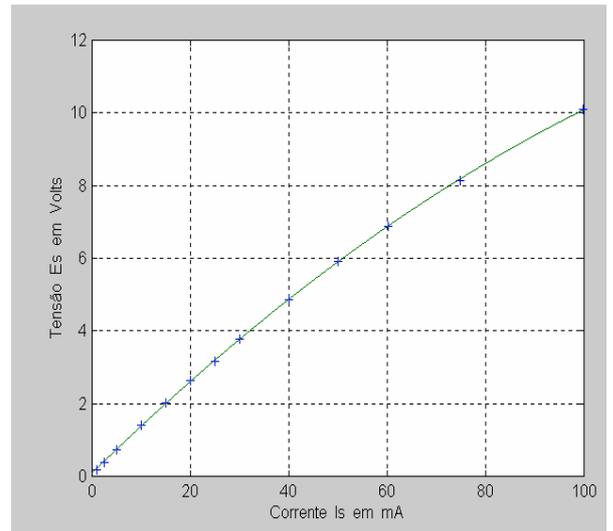


Fig. 11 - Tensão x Corrente na bobina do falante A.

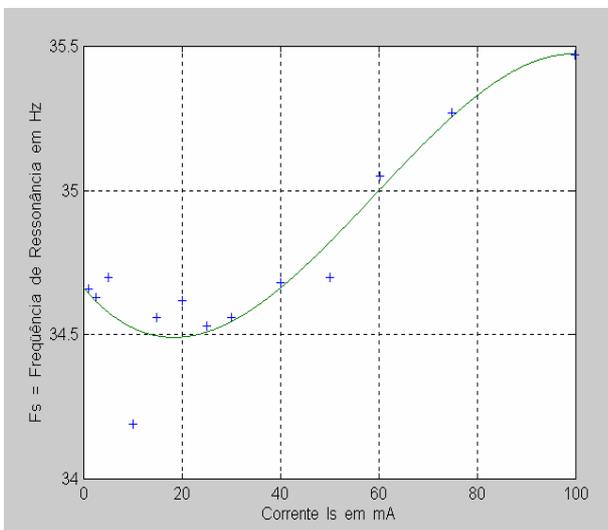


Fig. 12 - Frequência de Ressonância em função da Corrente no falante B.

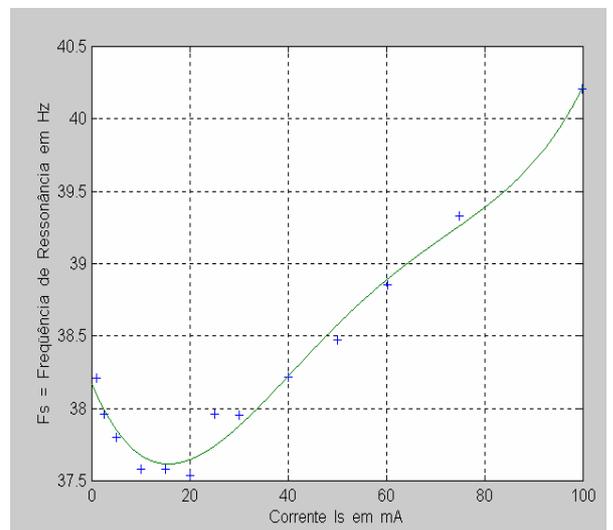


Fig. 13 - Frequência de Ressonância em função da corrente no falante A

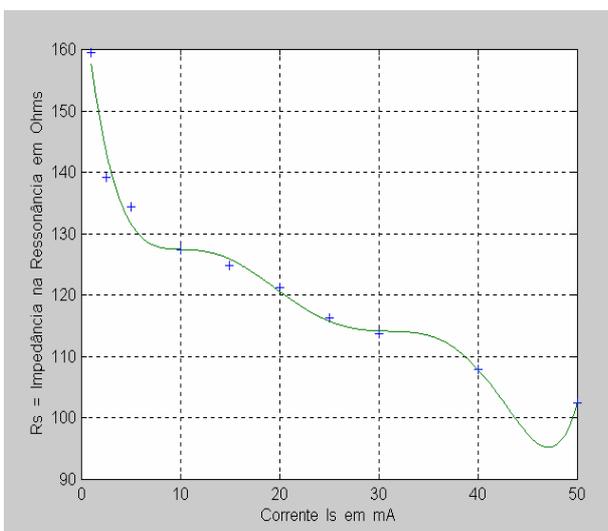


Fig. 14 - Resistência na Ressonância em função da corrente no falante B.

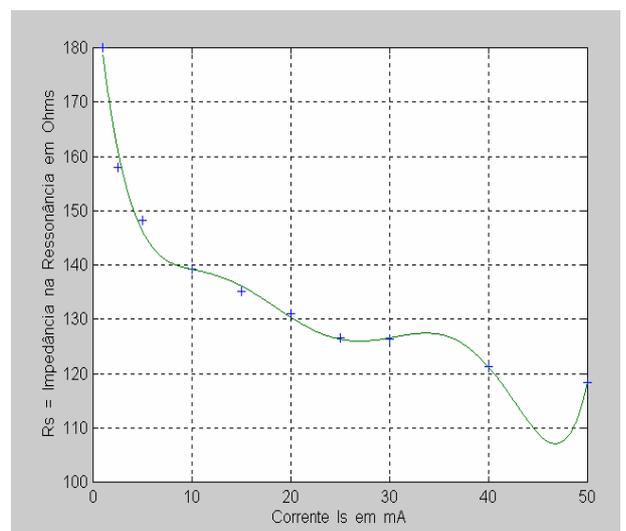


Fig. 15 - Resistência na Ressonância em função da corrente no falante A.

Conclusão

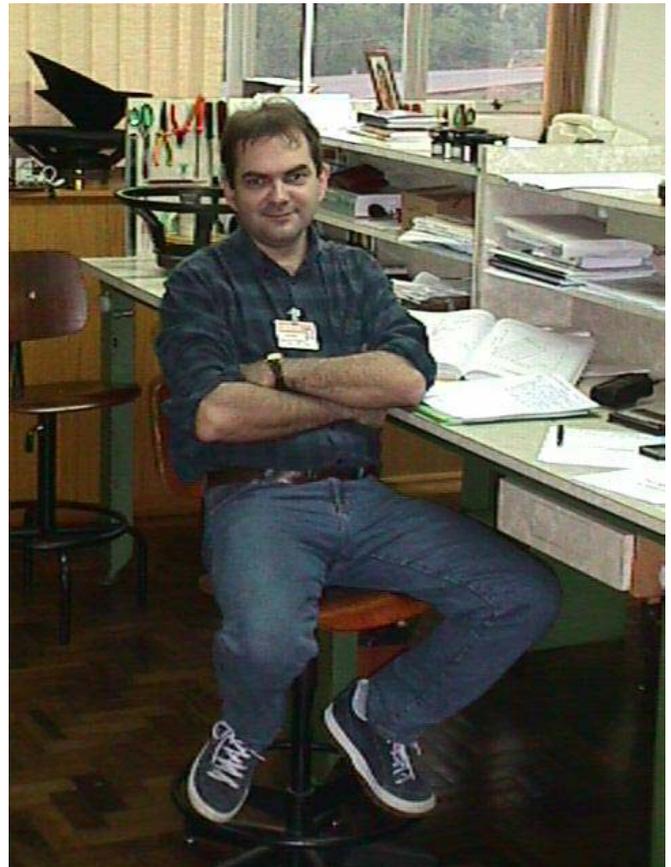
Os Autores são de opinião que, em caso de dúvida quanto aos resultados obtidos com diferentes instrumentos de medida, independentemente de quão sofisticados forem os mesmos, o método “manual”, proposto por Thiele e Small deverá ser utilizado como base de comparação.

A utilização do LMS como equipamento de medição, para obtenção da curva de impedância, e do LEAP como software de processamento, dão um excelente resultado, praticamente idêntico ao conseguido com o Brüel, mas a um custo muito inferior.

A grande divergência entre os valores medidos com o LMS, em relação ao Brüel, deve merecer uma análise mais aprofundada e certamente este problema poderá ser solucionado seja por um ajuste mais adequado do set up do programa ou pela alteração da rotina de processamento do software.



Homero Sette é Consultor da ELETRÔNICA SELENIUM S. A.
homero@selenium.com.br



Leonel Poltosi é Analista de Produto da ELETRÔNICA SELENIUM
leonel@selenium.com.br

Agradecimentos

Os Autores agradecem à ELETRÔNICA SELENIUM S. A . pelo suporte técnico e financeiro que tornaram possível a execução do presente trabalho e, em particular, ao estagiário Gustavo Pigatto Bohn, pela operação do Brüel.