

ASPECTOS PRÁTICOS NA UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DO CAMPO PRÓXIMO E ACELERÔMETRO PARA OBTENÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE RADIADORES ACÚSTICOS INVERSORES DE FASE

Luiz Alberto Koehler

Universidade Regional de Blumenau – FURB

Depto. de Engenharia Elétrica

Rua Araçatuba 83, Campus II, CEP 89030-080, Blumenau – SC

email: luiz@furb.br

Altamir Ronsani Borges

email: arb@furb.br

Resumo - Este trabalho faz uma análise das limitações e aspectos práticos envolvidos na medição da resposta em baixas frequências de radiadores acústicos inversores de fase, também conhecidos como "vented-box" ou "bass-reflex". Como alternativa ao método tradicional que faz uso de uma câmara anecóica, são apresentados os métodos do campo próximo e do acelerômetro. As respostas em frequência obtidas através destes métodos proporcionam resultados essencialmente anecóicos, mesmo se as medições forem feitas num ambiente comum. Os problemas que decorrem da transposição do modelo teórico para um sistema real são citados e simulados. Várias curvas de resposta em frequência obtidas experimentalmente são apresentadas e analisadas.

Abstract – This work makes an analysis of the limitations and practical aspects related to low frequency measurements of vented-box acoustic radiators. Alternative methods to traditional ones which require anechoic chambers are presented. These techniques, known as near field method and acceleration method, produce essentially anechoic results, despite measurements being made in a normal room. Problems associated to real systems are discussed. Several experimental results are also presented.

I. INTRODUÇÃO

Dentre os parâmetros de desempenho de alto-falantes e radiadores acústicos, a resposta em frequência é sem dúvida um dos mais importantes. Tradicionalmente, a resposta em frequência é medida em câmaras anecóicas. Entretanto, para medições eficientes em baixas frequências (aproximadamente 20 Hz), as dimensões internas da câmara, entre pontas das cunhas, tem que ser da ordem de 25 metros ou mais, o que torna a sua construção extremamente dispendiosa.

Para superar o problema da falta de uma câmara anecóica adequada, foram desenvolvidas várias técnicas alternativas para medir a resposta em frequência, como a medição da pressão acústica dentro

do enclausuramento, o método impulsivo, o método do campo próximo e o método que utiliza um acelerômetro.

O método de medição da pressão acústica dentro do enclausuramento [1] é válido somente para as baixas frequências e, apresenta várias restrições que dificultam sua aplicação. As principais dificuldades são a necessidade de fazer um furo no enclausuramento para a colocação do microfone, o problema das ondas estacionárias dentro do enclausuramento e a impossibilidade de acesso a resposta do alto-falante.

O método impulsivo que utiliza técnica digital foi descrito por Berman e Fincham [2] e, embora não necessite de uma câmara anecóica, apresenta limitações práticas em baixas frequências devido a necessidade de um ambiente de grandes dimensões.

O método do campo próximo descrito por Keele [3] e o método que utiliza um acelerômetro descrito por Christophorou [4], dispensam o uso de câmaras anecóicas e podem ser realizados em qualquer ambiente tendo, entretanto, suas aplicações restritas as baixas frequências. Esta restrição da aplicação dos métodos do campo próximo e do acelerômetro dentro da faixa das baixas frequências, é a mesma imposta aos modelos teóricos clássicos de alto-falantes e radiadores acústicos [5], [6]. Fato este que, juntamente com as dificuldades práticas das medições nas baixas frequências, torna a utilização destes métodos bastante interessante.

II. TEORIA BÁSICA: MÉTODO DO CAMPO PRÓXIMO E DO ACELERÔMETRO

A técnica de medição da resposta em frequência pelo método do campo próximo é baseada na proporcionalidade que existe nas baixas frequências ($ka < 1$), entre o campo acústico próximo e o campo acústico distante. Ou seja, a resposta em frequência medida bem próximo do diafragma do alto-falante é diretamente proporcional à resposta em frequência medida num ponto afastado. Devido ao alto nível de pressão sonora perto do diafragma do alto-falante (campo próximo), as reflexões do ambiente e o ruído de fundo não tem uma influência significativa. A pressão acústica no campo próximo também não é afetada pela

posição da fonte em relação ao ambiente (paredes próximas), ao contrário da pressão acústica no campo distante. Portanto, a medição da pressão acústica no campo próximo produz resultados essencialmente anecóicos, mesmo se efetuada num ambiente reverberante e com ruído de fundo.

A abordagem apresentada por Keele [3] considera o alto-falante como sendo um pistão rígido montado num "baffle" infinito (meio espaço). A relação entre a pressão acústica no campo próximo P_n e a pressão acústica no campo distante P_r , válida para baixas frequências ($ka < 1$), é dada por

$$P_f = \frac{a}{2r} P_n \quad (1)$$

Onde:

r = distância do ponto de medição no campo distante até o centro do pistão;

a = raio do pistão;

P_r = pressão acústica no campo distante;

P_n = pressão acústica no campo próximo (centro do pistão).

k = número de onda = $2\pi/\lambda = \omega/c$.

Como pode ser observado em (1), a relação entre o campo acústico próximo e o campo acústico distante para $ka < 1$, depende somente da distância da fonte até o ponto no campo distante e do raio do pistão e, é independente da frequência. Portanto, a resposta em baixas frequências (condições de campo livre ou anecóicas) do alto-falante ou de um radiador acústico, pode ser determinada através de uma simples medição da pressão acústica no campo próximo (ambiente comum). A resposta em campo distante sob condições anecóicas pode então ser obtida através de (1). A expressão (1) pressupõe que a medição da pressão acústica no campo próximo seja feita na distância $r=0$, ou seja, sobre a superfície do pistão, o que numa situação real, com a utilização de um microfone como transdutor, não é possível de ser realizado. Keele [3] obteve a expressão abaixo, válida para baixas frequências, para a pressão acústica axial em função da distância, normalizada pela pressão acústica no campo próximo ($r=0$).

$$\frac{P_r}{P_n(r=0)} = \sqrt{\left(\frac{r}{a}\right)^2 + 1} - \frac{r}{a} \quad (2)$$

Onde: P_r = pressão acústica na distância r ;
 $P_n(r=0)$ = pressão acústica na superfície do pistão.

Uma análise de (2) revela que uma diferença inferior a 1 dB entre as pressões P_r e $P_n(r=0)$ implica em uma distância máxima de **0,11a** entre o microfone e a superfície do pistão. Pode-se observar que as condições de campo distante (a pressão acústica cai 6 dB com a duplicação da distância) são satisfeitas para distâncias maiores que aproximadamente **2a**.

A técnica de medição da resposta em frequência que utiliza um acelerômetro é baseada na relação que existe nas baixas frequências ($ka < 1$) entre a pressão acústica no campo distante e a aceleração do pistão (ou diafragma do alto-falante). De [4] tem-se,

$$P_f = \frac{r_0 a^2}{2r} \alpha \quad (3)$$

e, portanto,

$$P_n = r_0 a \alpha \quad (4)$$

Onde: α = aceleração do pistão;

ρ_0 = densidade do ar.

Assim como o método do campo próximo, o método de medição da resposta em frequência que utiliza um acelerômetro, não sofre influência do ambiente no qual a fonte esta radiando e, portanto, também dispensa o uso da câmara anecóica. A validade das medições fica restrita à faixa de frequência onde o alto-falante se comporta como um pistão rígido, ou seja, nas baixas frequências.

Como pode ser visto em (3), a relação entre o campo acústico distante e a aceleração do pistão para $ka < 1$, depende somente da distância do ponto de medição no campo distante e do raio do pistão e é independente da frequência. Portanto, a resposta em baixas frequências do alto-falante pode ser conhecida, simplesmente medindo a aceleração do diafragma deste em função da frequência. A resposta no campo distante pode, então, ser obtida através de (3).

III. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DO CAMPO PRÓXIMO E DO ACELERÔMETRO PARA O CASO DE UM SISTEMA INVERSOR DE FASE

Para radiadores acústicos com mais de um elemento, como é o caso do sistema inversor de fase (alto-falante e duto), a resposta total do sistema no campo distante (ambiente anecóico) pode ser obtida através da medição das respostas individuais do alto-falante e do duto no campo próximo (ambiente comum). Como pode ser observado em (1) e (3), antes que as respostas de cada elemento medidas no campo próximo sejam somadas,

deve-se ajustar o nível relativo da cada elemento de acordo com seu raio e a distância até o ponto no campo distante. Têm-se que

$$P_{fa} = \frac{a_a}{2r_a} P_{na} \quad (5)$$

$$P_{fd} = \frac{a_d}{2r_d} P_{nd} \quad (6)$$

Onde: P_{fa} = pressão acústica do alto-falante no campo distante.

P_{na} = pressão acústica do alto-falante no campo próximo.

a_a = raio efetivo do diafragma do alto-falante.

r_a = distância do ponto de medição no campo distante até o centro do alto-falante.

P_{fd} = pressão acústica do duto no campo distante.

P_{nd} = pressão acústica do duto no campo próximo.

a_d = raio do duto.

r_d = distância do ponto de medição no campo distante até o centro do duto.

A resposta total no campo distante de um radiador inversor de fase (alto-falante e duto) é obtida pela soma vetorial (módulo e fase) das expressões (5) e (6).

$$P_{ft} = P_{fa} + P_{fd} = \frac{a_a}{2r_a} P_{na} + \frac{a_d}{2r_d} P_{nd} \quad (7)$$

Considerando a pressão resultante no campo distante P_{ft} em um ponto equidistante do alto-falante e do duto, $r_a = r_d = r$, como indicado na fig.1, tem-se que

$$P_{ft} = \frac{1}{2r} (P_{na} a_a + P_{nd} a_d) \quad (8)$$

Outra maneira de obter a resposta em frequência total de um sistema inversor de fase no campo distante (ambiente anecóico), consiste nas medições individuais da resposta da aceleração do diafragma do alto-falante (ambiente comum) e da resposta em campo próximo do duto (ambiente comum). A resposta total do sistema é, então, obtida através da soma vetorial (módulo e fase) das expressões (3) e (6).

$$P_{ft} = P_{fa} + P_{fd} = \frac{r_0 a_a^2}{2r_a} \mathbf{a}_a + \frac{a_d}{2r_d} P_{nd} \quad (9)$$

onde \mathbf{a}_a é a aceleração do diafragma do alto-falante.

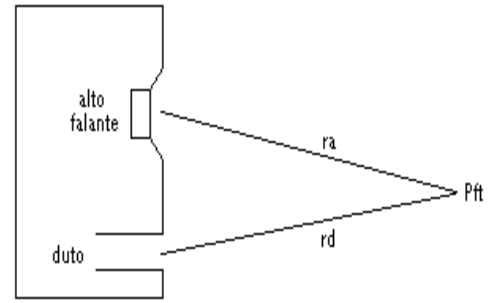


Fig.1 – Representação de um sistema inversor de fase com a indicação do ponto de medição da pressão acústica total no campo distante.

Considerando a pressão resultante no campo distante P_{ft} em um ponto equidistante do alto-falante e do duto, $r_a = r_d = r$, como indicado na fig.1, tem-se que

$$P_{ft} = \frac{1}{2r} (r_0 a_a^2 \mathbf{a}_a + P_{nd} a_d) \quad (10)$$

A fig.2 mostra as curvas teóricas [7] dos módulos das respostas em frequência típicas de um sistema inversor de fase, onde se pode observar a contribuição individual do alto-falante e do duto na resposta total do sistema. Observa-se que a resposta do alto-falante é quase nula na frequência f_b , de sintonia do enclausuramento.

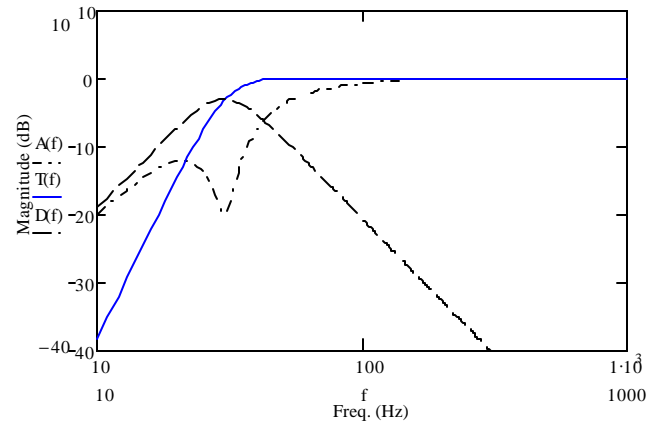


Fig.2 – Resposta em frequência típica de um sistema inversor de fase com a indicação da contribuição do alto-falante (---) e do duto (---) na resposta total (linha cheia). $Q_t=0,4$; $Q_l=7$; $f_s=30$ Hz; $f_b=30,318$ Hz; $\alpha=1,1141$.

IV. ASPECTOS PRÁTICOS EM RELAÇÃO AOS MÉTODOS DO CAMPO PRÓXIMO E DO ACELERÔMETRO

Tanto o método do campo próximo como o método que faz uso de um acelerômetro são baseados no modelo de uma fonte do tipo pistão circular plano e rígido montado em um "baffle" infinito (meio-espaço). No caso prático de um alto-falante, a validade do método está associada à faixa de frequência onde o diafragma se comporta como um corpo rígido. Esta faixa estende-se normalmente até a frequência com um comprimento de onda equivalente a circunferência do diafragma do alto-falante ($f < 343/2pa$ ou $ka < 1$). Quanto ao formato cônico do diafragma dos alto-falantes, constata-se na prática, que o modelo do pistão circular plano pode ser estendido para um pistão do tipo cônico.

Existem vários fatores experimentais práticos envolvidos com os métodos de medição no campo próximo e o que faz uso de um acelerômetro. Para o método do campo próximo, onde o transdutor é um microfone, a dificuldade está em estabelecer a máxima pressão sonora no campo próximo. Ou seja, posicionar o microfone no centro acústico do alto-falante e do duto. Este afastamento do microfone em relação ao centro acústico ocasiona uma diminuição na amplitude da pressão sonora máxima que deveria ser medida, como pode ser constatado em (2). No caso de um sistema inversor de fase, existe ainda o problema do ruído cruzado entre o alto-falante e o duto. Como pode ser observado na fig.2, a resposta do alto-falante tende a um valor quase nulo na frequência de sintonia f_b do enclausuramento e, conseqüentemente, o microfone que está posicionado próximo ao alto-falante acaba também lendo parte da resposta do duto. O mesmo acontece com o microfone posicionado próximo ao duto, que acima de aproximadamente $1,6 f_b$ acaba lendo parte da resposta do alto-falante. O método de medição da aceleração do diafragma do alto-falante tem como maior limitação o peso do acelerômetro, que pode influir na massa total do diafragma do alto-falante. Entretanto, existem acelerômetros disponíveis no mercado com pequena massa, o que torna desprezível o efeito da massa adicional. A utilização de um acelerômetro como transdutor possui as vantagens deste poder ser posicionado no centro acústico do alto-falante e de não ser sensível ao ruído cruzado provocado pelo duto.

A resposta total de um sistema inversor de fase é obtida através da soma vetorial das respostas individuais do alto-falante e do duto. Entretanto, conforme indicado em (5) e (6), antes que as respostas medidas no campo próximo sejam somadas, deve-se ajustar o nível da resposta de cada elemento de acordo com seu raio efetivo e a distância até o ponto de medição no campo distante. O raio efetivo aparece como uma constante que multiplica a resposta em frequência medida no campo próximo, não alterando a

forma da curva de resposta em frequência. O mesmo pode ser dito da distância do microfone em relação a fonte.

Constata-se que para situações práticas, no caso de se considerar a resposta individual de um alto-falante (e/ou de um duto), os possíveis erros relacionados com a falta de precisão na determinação do raio efetivo, na distância até o ponto no campo distante e na distância do microfone em relação ao centro acústico, estes não chegam a comprometer os resultados obtidos. Entretanto, no caso de um sistema inversor de fase, onde a resposta total é obtida através da soma vetorial das respostas individuais do alto-falante e do duto, verifica-se que uma pequena diferença na determinação do valor do raio efetivo ou no posicionamento do microfone no campo próximo, comprometem significativamente a resposta em frequência total do sistema. Na fig.3 é apresentada uma simulação do erro causado na resposta em frequência total de um sistema inversor de fase devido ao afastamento do microfone em relação ao centro acústico do alto-falante e do duto (diferença de 1 dB).

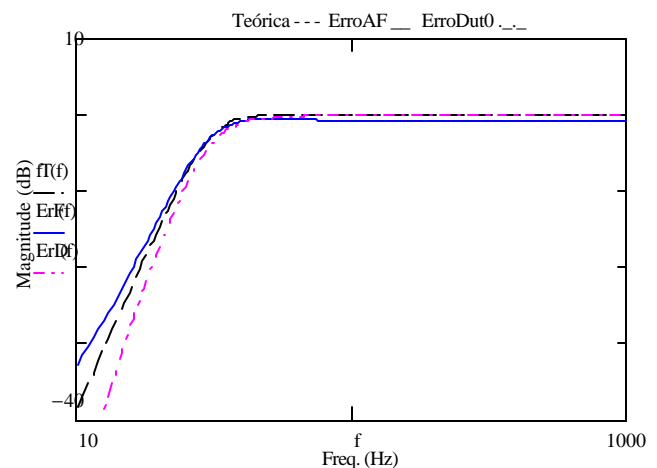


Fig.3 - Simulação do erro causado na resposta em frequência total de um sistema inversor de fase devido ao afastamento do microfone em relação ao centro acústico do alto-falante e do duto (diferença de 1 dB).

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As medições das respostas em frequência pelos métodos do campo próximo e do acelerômetro, neste trabalho, foram feitas num ambiente comum (não anecóico). O esquema de medição está indicado na fig.4. O microfone foi posicionado no centro do duto, com a grade no plano do "baffle" frontal do radiador. No caso do alto-falante, o microfone foi posicionado o mais perto possível do centro do cone. Quanto ao acelerômetro, este foi fixado com cera ao ponto mais saliente da calota do alto-falante, tendo seu eixo perpendicular ao plano de projeção do diafragma.

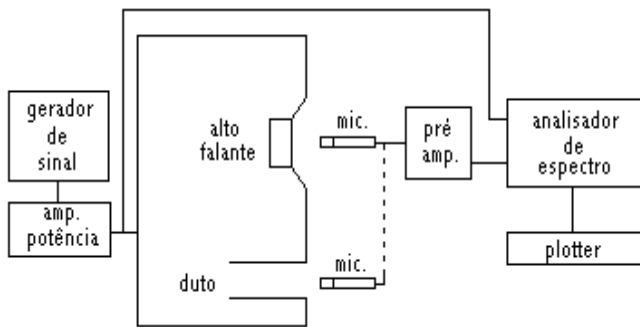


Fig.4 – Esquema do sistema utilizado na medição da resposta em frequência (campo próximo).

Na fig.5 estão indicadas as repostas em frequência (módulo) do alto-falante de um sistema inversor de fase obtidas através dos métodos do campo próximo e do acelerômetro. A resposta medida com o acelerômetro apresenta um mínimo numa frequência maior do que a resposta medida no campo próximo (para a frequência em torno de 60 Hz).

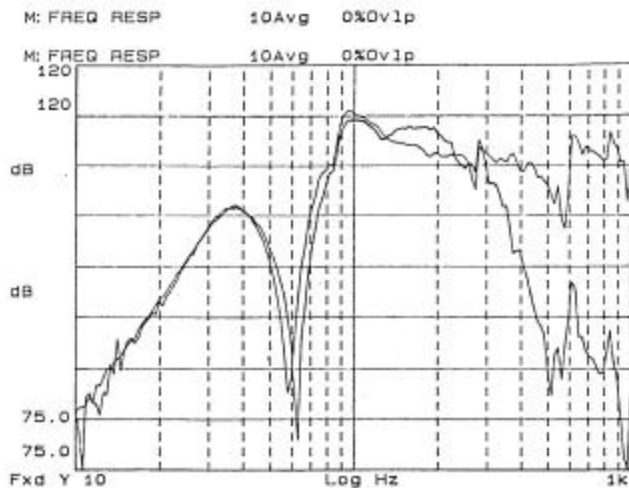


Fig. 5 – Respostas do alto-falante de um sistema inversor de fase medidas pelos métodos do campo próximo e do acelerômetro. A resposta medida pelo método do acelerômetro tem uma queda acentuada a partir dos 300 Hz.

Na fig.6 estão indicadas as repostas em frequência do duto de um sistema inversor de fase obtidas através da medição no campo próximo. A diferença entre as curvas deve-se a um pequeno afastamento do microfone, em relação ao eixo axial, entre as duas medições.

Na fig.7 faz-se uma comparação entre as repostas em frequência teórica e experimental do sistema inversor de fase das fig.5 (alto-falante) e fig.6 (duto). A curva experimental foi obtida a partir das repostas do alto-falante e do duto medidas no campo próximo.

Pode-se observar a grande discrepância entre as curvas para as bem baixas frequências (entre 10 Hz e 70 Hz).

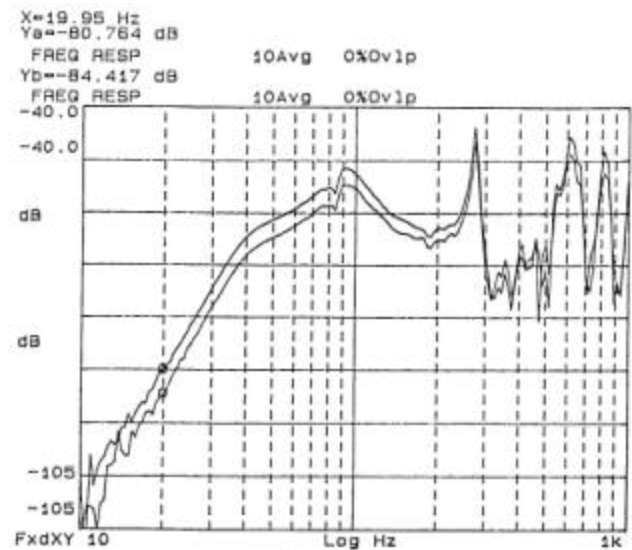


Fig.6 – Respostas do duto de um sistema inversor de fase medidas pelo método do campo próximo com um pequeno afastamento do microfone em relação ao eixo axial entre as duas medições.

Tal diferença deve-se principalmente ao afastamento do microfone em relação ao centro acústico do duto, que a princípio é desconhecido. A mesma diferença pode ser constatada na simulação apresentada na fig.3.

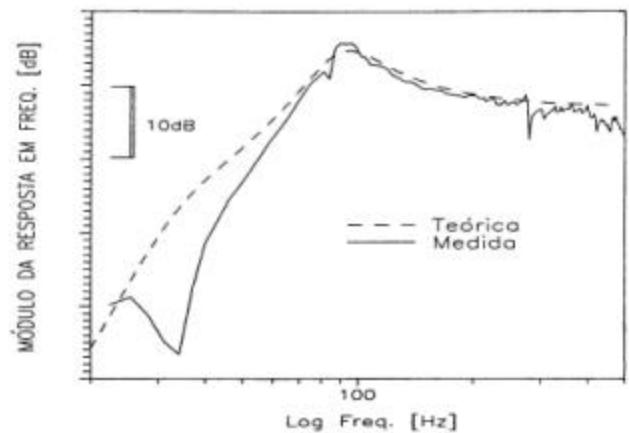


Fig.7 – Comparação entre as repostas em frequência teórica e experimental (método do campo próximo) de um sistema inversor de fase.

VI. CONCLUSÕES

Conclui-se que a obtenção da resposta em frequência de um sistema inversor de fase, através dos métodos do campo próximo e do acelerômetro, pode levar a resultados bastante discrepantes. Tais erros são função da distância do microfone em relação a fonte (alto-

falante ou duto) e do valor efetivo do raio destes elementos. Um erro na determinação destas grandezas, mesmo que pequeno, pode comprometer significativamente o resultado final. Consta-se na prática que a resposta total “correta” do sistema só é alcançada após um cansativo e cuidadoso processo de tentativas e erros, que consiste num ajuste relativo das amplitudes das respostas individuais do alto-falante e do duto.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Small, R. H., "Simplified Loudspeaker Measurements at Low Frequencies", J. Audio Eng. Soc., vol. 20, p.28-33 (Jan./Feb. 1972).

[2] Berman, J. M. e Fincham, L. R., "The Application of Digital Techniques to the Measurement of Loudspeakers", J. Audio Eng. Soc., vol. 25, p. 370-384 (June 1977).

[3] Keele Jr., D. B., "Low-Frequency Loudspeaker Assesment by Nearfield Sound-Pressure Measurement", J. Audio Eng. Soc., vol 22, p. 154-162 (Apr. 1974).

[4] Christophrou, J., "Low-Frequency Loudspeaker Measurements with an Accelerometer", J. Audio Eng. Soc., vol. 28, p. 809-815 (Nov. 1980).

[5] Beranek, L.L., Acoustics (McGraw-Hill, New York, 1954).

[6] Small, R. H., "Vented-Box Loudspeaker Systems Part I: Small-Signal Analysis", J. Audio Eng. Soc., vol. 21, p.363-372 (June 1973).

[7] Koehler, L. A., "Análise e Medição da Resposta em Baixas Frequências de Radiadores Acústicos Tipo Vented-Box", Dissertação de Mestrado, UFSC, Depto. Eng. Mecânica (Dez. 1992).