



COPPE/UFRJ

TÉCNICA PARA CALIBRAÇÃO DE MICROFONES DE MEIA POLEGADA
POR RECIPROCIDADE EM CAMPO LIVRE

Thiago Antônio Bacelar Milhomem

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores:

Zemar Martins Defilippo Soares

Ricardo Eduardo Musafir

Rio de Janeiro

Outubro de 2008

TÉCNICA PARA CALIBRAÇÃO DE MICROFONES DE MEIA POLEGADA
POR RECIPROCIDADE EM CAMPO LIVRE

Thiago Antônio Bacelar Milhomem

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Ricardo Eduardo Musafir, D.Sc.

Eng. Zemar Martins Defilippo Soares, Dr.Eng.

Prof. Jules Ghislain Slama, D.Sc.

Prof. Fernando Augusto Noronha Castro Pinto, Dr.Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2008

Milhomem, Thiago Antônio Bacelar

Técnica para Calibração de Microfones de Meia Polegada Por Reciprocidade em Campo Livre / Thiago Antônio Bacelar Milhomem. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XIV, 108 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Zemar Martins Defilippo Soares, Ricardo Eduardo Musafir.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 105-108.

1. Calibração de Microfones. I. Soares, Zemar Martins Defilippo *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Dedico esta dissertação aos meus pais Álvaro e Maria da Graça pelo exemplo, apoio e eterno incentivo. Também dedico à minha irmã Gabriela e a todos aqueles que efetivamente me ajudaram a superar as dificuldades encontradas no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Inmetro por ter me oferecido a oportunidade de participar deste trabalho de desenvolvimento da metrologia primária brasileira.

Agradeço especialmente aos colegas Gilmar Machado Ximenes, Walter Erico Hoffmann, Gustavo Palmeira Ripper, Marco Antonio Nabuco de Araujo e Paulo Medeiros Massarani por terem me incentivado à realização do mestrado. Ao colega e orientador Zemar Martins Defilippo Soares por ter me apoiado no desenvolvimento deste trabalho e pela leitura, correção e discussão da dissertação. Ao colega Swen Eric Müller por ter desenvolvido sob-medida o sistema de medição Aurélio CMF22 e o programa Monkey Forest utilizados neste trabalho. Ao colega Dimas Barbosa Teixeira pelo suporte eletro-eletrônico.

Agradeço ao professor e orientador Ricardo Eduardo Musafir pela leitura, correção e discussão da dissertação.

Finalmente, agradeço aos colegas da Divisão de Metrologia Acústica e de Vibrações e aos professores e colegas do Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelas discussões, idéias e sugestões.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TÉCNICA PARA CALIBRAÇÃO DE MICROFONES DE MEIA POLEGADA
POR RECIPROCIDADE EM CAMPO LIVRE

Thiago Antônio Bacelar Milhomem

Outubro/2008

Orientadores: Zemar Martins Defilippo Soares

Ricardo Eduardo Musafir

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho propõe uma técnica de medição para a calibração de microfones por reciprocidade em campo livre que permite identificar e remover a interferência elétrica entre canais de um sistema de medição (diafonia), a interferência entre o som direto e o seu espalhamento nas bordas dos microfones (inter-espalhamento), e as reflexões nas paredes da câmara anecóica e nos suporte mecânicos, quando da determinação da impedância de transferência elétrica. São apresentados os métodos de calibração de microfones nos campos de “pressão”, difuso e livre, e é detalhado o método de calibração primária de microfones por reciprocidade em campo livre. As técnicas de medição existentes para a determinação da impedância de transferência elétrica são apresentadas. Na técnica proposta, a diafonia é removida por subtração e o inter-espalhamento e as reflexões são removidos por um procedimento de seleção no tempo com aplicação de uma janela híbrida. A validação da técnica nos permite concluir por sua aplicabilidade. A técnica foi adotada na calibração primária de microfones por reciprocidade em campo livre pelo Inmetro, instituto nacional de metrologia do Brasil.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TECHNIQUE FOR FREE-FIELD CALIBRATION OF
HALF INCH MICROPHONES BY RECIPROCITY

Thiago Antônio Bacelar Milhomem

October/2008

Advisors: Zemar Martins Defilippo Soares
Ricardo Eduardo Musafir

Department: Mechanical Engineering

This work proposes a measurement technique for the free-field calibration of microphones by reciprocity that allows the identification and removal of the effects of crosstalk, multiple backscattering between the microphones and reflections on the anechoic chamber walls and on the microphone supports, when determining the electrical transfer impedance. The microphone calibration methods in “pressure-field”, diffuse-field and free-field conditions are described, particular attention being given to the primary method for free-field calibration of microphones by reciprocity. The existing measurement techniques for determining the electrical transfer impedance are presented. In the proposed technique, the crosstalk is removed by the subtraction while the multiple backscattering and the reflections are removed by a time selective technique with the application of a hybrid window. The validation of the technique allows us to conclude on its applicability. The technique was adopted for primary free-field calibration of microphones by reciprocity in Inmetro, the national metrology institute of Brazil.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MICROFONES DE MEDIÇÃO	4
2.1	Introdução	4
2.2	Calibração Secundária	6
2.2.1	Por Atuador Eletrostático	6
2.2.2	Por Comparação	8
2.3	Calibração Primária	15
2.3.1	Por Reciprocidade	15
3	CALIBRAÇÃO DE MICROFONES LS2 POR RECIPROCIDADE EM CAMPO LIVRE	22
3.1	Introdução	22
3.2	Cálculo das Sensibilidades	22
3.2.1	Correção da Sensibilidade para as Condições Ambientais de Referência .	24
3.3	Determinação da Impedância de Transferência Acústica	26
3.3.1	Densidade do Ar	27
3.3.2	Coeficiente de Absorção do Som pelo Ar	27
3.3.3	Distância entre os Centros Acústicos dos Microfones	28
3.4	Determinação da Impedância de Transferência Elétrica	36
3.4.1	Cálculo dos Níveis Típicos de Sinais	37
3.4.2	Medição da Corrente de Entrada no Terminal Elétrico do Microfone	40
4	DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA ELÉTRICA	43
4.1	Técnica Clássica	43
4.2	Técnica Proposta por Barrera-Figueroa	45
4.3	Técnica Proposta	49
4.3.1	Subtração da Diafonia	53
4.3.2	Supressão do Inter-espalhamento e das Reflexões nas Paredes da Câmara Anecóica e nos Suportes Mecânicos	56
4.3.3	Comparação entre a Técnica Proposta e Técnica Clássica	59

4.3.4	Sistema de Medição	66
4.3.5	Resultados	70
5	CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	73
5.1	Introdução	73
5.1.1	Avaliação da Incerteza de Medição das Estimativas de Entrada	73
5.1.2	Cálculo da Incerteza Padrão Combinada	75
5.1.3	Cálculo da Incerteza Expandida	76
5.2	Cálculo da Incerteza de Medição na Calibração por Reciprocidade em Campo Livre	76
5.2.1	Determinação da Sensibilidade em Campo Livre para as Condições Ambientais de Medição	77
5.2.2	Correção da Sensibilidade para as Condições Ambientais de Referência .	79
5.2.3	Demais Fontes de Incerteza	80
6	VALIDAÇÃO	88
6.1	Introdução	88
6.2	Resultados	89
7	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	92
7.1	Conclusões	92
7.2	Propostas para Trabalhos Futuros	93
APÊNDICE A	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA DENSIDADE DO AR	94
APÊNDICE B	PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DO SOM PELO AR	97
APÊNDICE C	RESULTADO DAS MEDIÇÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE SIGLAS

B&K	<i>Brüel & Kjaer;</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures;</i>
CCAUV	<i>Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration;</i>
CENAM	<i>Centro Nacional de Metrologia;</i>
CSIRO	<i>National Measurement of Metrology;</i>
DPLA	<i>Danish Primary Laboratory for Acoustics;</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier;
GUM	<i>Central Office of Measures;</i>
INM	Instituto nacional de metrologia;
IFFT	Transformada (Rápida) Inversa de Fourier;
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial;
KRISS	<i>Korea Research Institute of Standards and Science;</i>
LNE	<i>Laboratoire National d'Essais;</i>
LS1	Microfone de medição padrão de laboratório de uma polegada;
LS2	Microfone de medição padrão de laboratório de meia polegada;
NIM	<i>National Institute of Metrology;</i>
NPL	<i>National Physical Laboratory;</i>
NRC	<i>National Research Council;</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology;</i>
NMIJ	<i>National Metrology Institute of Japan;</i>
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt;</i>
UME	<i>Ulusal Merroloji Enstitüsü;</i>
VNIIFTRI	<i>All-Russian Scientific and Research Institute for Physical-Technical and Radiotechnical Measurements;</i>

LÍSTA DE SÍMBOLOS

a_+	Limite superior para o valor da grandeza;
a_-	Limite inferior para o valor da grandeza;
a_i	Constantes polinomiais utilizadas no cálculo dos coeficientes para pressão estática e temperatura;
a_s	Razão entre a área efetiva do atuador e a área ativa do diafragma;
B	Constante de proporcionalidade linear;
b	Interseção da reta com o eixo das ordenadas;
C	Constante de proporcionalidade linear ($\neq B$);
C_x	Capacitância do capacitor colocado em série com o microfone utilizado como fonte sonora;
c_i	Coefficiente de sensibilidade;
D	Posição do centro acústico em relação ao diafragma;
D_i	Posição do centro acústico em relação ao diafragma para o microfone i ;
d	Distância;
d_{ad}	Distância efetiva entre o atuador e o diafragma;
d_{ij}	Distância entre os centros acústicos dos microfones i e j ;
$ E_n $	Módulo do erro normalizado;
F	Função modelo;
f	Frequência de excitação;
f_0	Frequência de ressonância;
G_D	Nível de sensibilidade em campo difuso do medidor de nível sonoro sob calibração;
$i_{t,i}$	Módulo da corrente de entrada no terminal elétrico do microfone i utilizado como fonte sonora;

$\dot{I}_{t,i}$	Corrente de entrada (complexa) no terminal elétrico do microfone i utilizado como fonte sonora;
j	$\sqrt{-1}$;
k	Fator de abrangência;
k_o	Número de onda;
L_D	Nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro sob calibração;
$L_{D,ref}$	Nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro de referência;
M_i	Módulo da sensibilidade para o microfone i ;
\underline{M}_i	Sensibilidade (complexa) do microfone i ;
$M_{f,i}$	Módulo da sensibilidade em campo livre do microfone i ;
$M_{f,dB,cm}$	Sensibilidade em campo livre, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de medição;
$M_{f,dB,ref}$	Sensibilidade em campo livre, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de referência;
m	Coefficiente angular da reta utilizada para determinar a posição do centro acústico do microfone;
n	Número de observações estatisticamente independentes ($n > 1$);
p_s	Pressão estática nas condições de medição;
p_{act}	Pressão eletrostática no diafragma;
$p_{s,r}$	Pressão estática nas condições de referência;

$s(x)$	Desvio padrão experimental;
T	Temperatura termodinâmica nas condições de medição;
T_r	Temperatura termodinâmica nas condições de referência;
U	Incerteza expandida;
U_i	Tensão de saída do microfone i ;
U_{ger}	Tensão aplicada pelo gerador de sinais (amplitude do sinal de excitação);
$U_{r,j}$	Módulo da tensão de circuito aberto no microfone j utilizado como receptor sonoro;
$\underline{U}_{r,j}$	Tensão de circuito aberto (complexa) no microfone j utilizado como receptor sonoro;
$U_{t,i}$	Tensão sobre o capacitor colocado em série com o microfone i utilizado como fonte sonora;
$u(y)$	Incerteza padrão combinada;
$u_i(y)$	Contribuição à incerteza padrão combinada;
$u(x_i)$	Incerteza padrão;
X_i	Grandeza genérica;
x_i	Valor estimado;
x_{ij}	Distância entre os diafragmas dos microfones i e j ;
$\underline{Z}_{a,i}$	Impedância acústica (complexa) do microfone i ;
$Z_{a,ij}$	Módulo da impedância de transferência acústica entre os microfones i e j ;

$\underline{Z}_{a,ij}$	Impedância de transferência acústica (complexa) entre os microfones i e j ;
$Z_{e,ij}$	Módulo da impedância de transferência elétrica entre os microfones i e j ;
$\underline{Z}_{e,ij}$	Impedância de transferência elétrica (complexa) entre os microfones i e j ;
α	Coefficiente de absorção do som pelo ar;
$\gamma = \alpha + j\beta$	Número de onda complexo, sendo α o coeficiente de absorção do som pelo ar e β o coeficiente de perda termo-viscosa;
δ_p	Coefficientes para pressão estática;
δ_T	Coefficientes para temperatura;
ε_{gas}	Constante dielétrica do gás no espaço entre o atuador e o diafragma;
ρ	Densidade do ar;
τ	Atraso de grupo;
ω	Frequência angular;

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A confiabilidade nas medições do nível de pressão sonora é garantida quando é evidenciada a sua rastreabilidade, que passa pelos laboratórios de calibração acreditados, pelos institutos nacionais de metrologia (INMs) e chega ao *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM).

O BIPM, órgão máximo na estrutura hierárquica de rastreabilidade, determina que a unidade do sistema internacional na área de acústica, o pascal, seja reproduzida na calibração por reciprocidade de microfones de medição padrões de laboratório de uma polegada (LS1) e de meia polegada (LS2).

A calibração por reciprocidade no chamado “campo de pressão” de microfones LS1 e LS2 provê rastreabilidade para as calibrações de ouvidos artificiais (utilizados nas calibrações de fones de ouvido) e para as calibrações dos calibradores de nível sonoro (utilizados na regulagem de medidores de nível sonoro). Já a calibração por reciprocidade em campo livre de microfones LS1 e LS2 provê rastreabilidade para as calibrações de medidores de nível sonoro em campo livre (utilizados nas medições de ruído ambiental), para as calibrações de microfones de medição padrões de trabalho (utilizados nas medições de potências sonoras em campo livre), para as medições da resposta em frequência de alto-falantes e para quaisquer medições de nível de pressão sonora em campo livre. A calibração por reciprocidade em campo difuso ainda não foi implementada.

A calibração por reciprocidade em “campo de pressão” de acordo com a norma internacional IEC 61094-2 [1] é realizada por muitos INMs e o método utilizado já foi verificado em diversas intercomparações laboratoriais. Na mais recente delas, a CCAUV.A-K3, realizada em 2003 e conduzida pelo *Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration* (CCAUV) com a participação de 15 INMs (DPLA da Dinamarca, NPL do Reino Unido, PTB da Alemanha, NMIJ do Japão, LNE da França, KRISS da Coreia, GUM da Polônia, CENAM do México, NIST dos Estados Unidos, NIM da China, CSIRO da Austrália, NRC do Canadá, UME da Turquia, Inmetro do Brasil, VNIIFTRI da Rússia), o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro), mostrou que já domina este método,

conforme resultado apresentado no relatório final da intercomparação laboratorial CCAUV.A-K3 [2,3] (ver Figura 1.1).

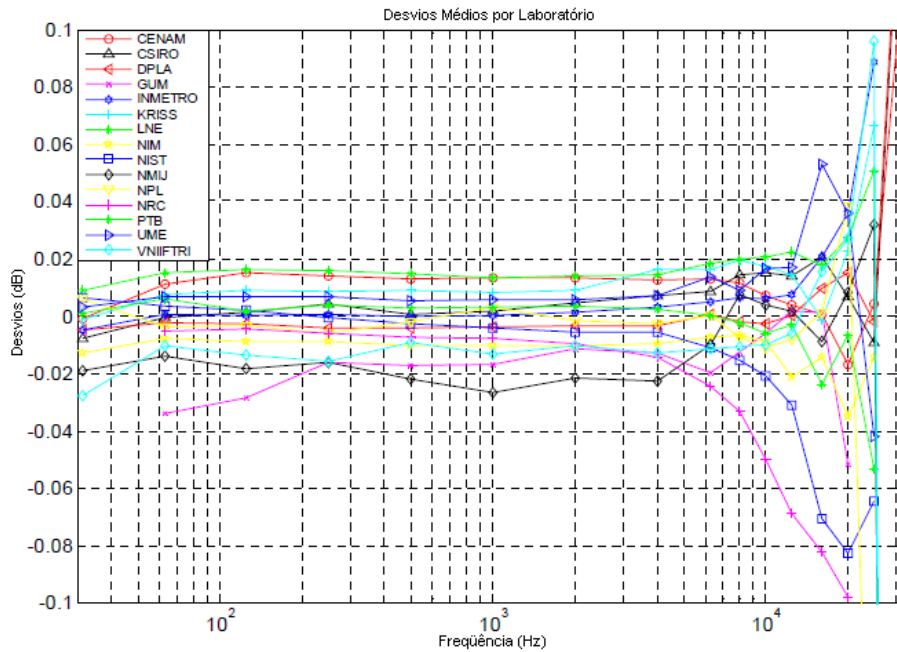


Figura 1.1 – Resultado da CCAUV.A-K3: desvios por laboratório como função da frequência [2,3].

Por outro lado, a calibração por reciprocidade em campo livre de acordo com a norma internacional IEC 61094-3 [4] só é realizada por poucos INMs e o método utilizado está sendo verificado pela primeira vez em uma intercomparação laboratorial no âmbito do CCAUV, a CCAUV.A-K4, iniciada em 2007. Esta intercomparação é conduzida pelo CCAUV com a participação de 9 INMs (LNE da França, CENAM do México, DPLA da Dinamarca, Inmetro do Brasil, KRISS da Coreia, NIST dos Estados Unidos, NMIJ do Japão, NPL do Reino Unido e PTB da Alemanha), segundo a minuta do protocolo da intercomparação laboratorial CCAUV.A-K4 [5].

A calibração por reciprocidade é obtida através da determinação da impedância de transferência acústica (que é função do acoplamento acústico entre os microfones) e da determinação da impedância de transferência elétrica (definida pela razão entre a tensão elétrica e a corrente elétrica nos terminais dos microfones).

Na calibração por reciprocidade em campo livre, a determinação da impedância de transferência elétrica é um processo muito difícil e complicado, pois a amplitude da tensão elétrica é da ordem de microvolt, mesma ordem de grandeza do ruído elétrico.

Isso que cria uma série de problemas para determiná-la, como a diafonia (*crosstalk*), o inter-espalhamento (*multiple backscattering*) e as reflexões nas paredes da câmara anecóica e nos suportes mecânicos.

A técnica clássica para a determinação da impedância de transferência elétrica detecta a presença dessas imperfeições, mas não permite identificá-las e nem removê-las, o que resulta em efeitos nocivos para a resposta em frequência do microfone. Já a técnica proposta por Barrera-Figueroa consegue identificar e remover estas imperfeições por uma técnica de seleção no tempo com a aplicação de uma janela Tukey, entretanto, a janela tem de ser muito estreita para remover a diafonia, o que também resulta em efeitos nocivos para a resposta em frequência do microfone.

A motivação deste trabalho é propor uma técnica de medição que permita identificar e remover a diafonia, o inter-espalhamento e as reflexões, na determinação da impedância de transferência elétrica causando o menor efeito nocivo possível para resposta em frequência do microfone.

O Capítulo 2 apresenta, de forma resumida, os métodos de calibração, secundária e primária, de microfones de medição nos campos sonoros de “pressão”, difuso e livre, já consolidados internacionalmente.

O Capítulo 3 apresenta, de forma detalhada, o método de calibração por reciprocidade em campo livre de microfones LS2 segundo a IEC 61094-3. Apresenta também o cálculo das sensibilidades assim como os procedimentos para a determinação da impedância de transferência acústica e introduz a determinação da impedância de transferência elétrica.

O Capítulo 4 apresenta e compara as técnicas existentes com a técnica proposta para a determinação da impedância de transferência elétrica.

O Capítulo 5 apresenta o cálculo da incerteza de medição da calibração por reciprocidade em campo livre de um microfone LS2 utilizando a técnica proposta.

O Capítulo 6 apresenta a validação da técnica proposta.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho, bem como propostas para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MICROFONES DE MEDIÇÃO

2.1 Introdução

Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia [6], conhecido como VIM, calibração é o *“conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões”*.

Existem duas classes hierárquicas de calibração: a calibração secundária e a calibração primária. Na calibração secundária, normalmente se determinam as características do objeto sob calibração a partir das características correspondentes, estabelecidas por padrão de mesma unidade que a do objeto sob calibração. Por exemplo, segundo a IEC 61094-5 [7], calcula-se a sensibilidade de um microfone de medição padrão de trabalho (WS1, WS2 e WS3) através da sensibilidade de um microfone de referência. Já na calibração primária, normalmente se determinam as características do objeto sob calibração a partir das características correspondentes, estabelecidas por padrões de unidades diferentes da unidade do objeto sob calibração. Por exemplo, segundo IEC 61094-2 [1], calcula-se a sensibilidade de um microfone de medição padrão de laboratório (LS1 e LS2) através da medição de tensão e corrente elétricas, comprimento, área, volumes, velocidade, calor específico, densidade e condições ambientais (temperatura, umidade relativa e pressão estática).

A calibração de um microfone consiste em determinar a sua sensibilidade para cada frequência. A magnitude da sensibilidade pode ser apresentada em escala linear em V/Pa ou em escala logarítmica em dB referenciado a 1 V/Pa. A fase pode ser apresentada em graus ou radianos.

Na prática, as medições acústicas são realizadas em diferentes tipos de campos sonoros. Nas baixas frequências, quando o microfone pode ser tratado como um monopolo, a magnitude da sensibilidade do microfone independe do campo enquanto que, nas médias e altas frequências, ela depende do campo. Neste caso, a magnitude da

sensibilidade do microfone deve ser determinada em um campo com característica similar a do campo onde o microfone será utilizado para fazer as medições.

Os tipos de campo sonoro utilizados na calibração de microfones são três: “campo de pressão”, campo difuso e campo livre.

O chamado “campo de pressão” é caracterizado por uma pressão sonora a qual tem a mesma magnitude e fase em qualquer posição dentro de uma seção do campo sonoro. Campos com essas características podem ser encontrados em cavidades com dimensões pequenas comparadas ao comprimento de onda como, por exemplo, em acopladores (utilizados em calibrações de fones de ouvido ou em calibrações de microfones) e em calibradores de nível sonoro [8].

O campo difuso existe em uma dada localização se o campo é criado por ondas sonoras surgindo simultaneamente de todas as direções com igual probabilidade e igual amplitude. Campos sonoros com característica similar a do campo difuso podem ser encontrados em ambientes tais como fábricas onde existem muitas fontes de ruído.

No campo livre, a propagação acontece livremente sem a interferência de qualquer objeto. Aproximações desse campo podem ser encontradas em câmaras anecóicas.

A Figura 2.1 compara as magnitudes das sensibilidades de um mesmo microfone obtidas nestes três tipos de campos.

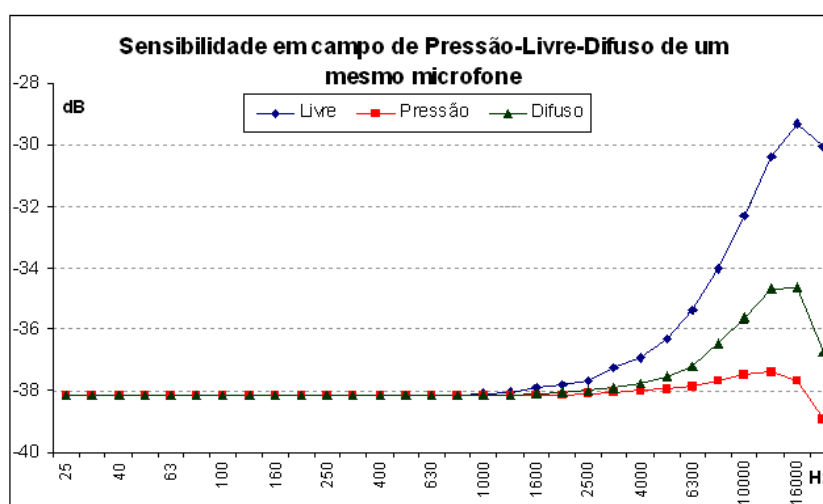


Figura 2.1 – Magnitudes das sensibilidades em “campo de pressão”, campo difuso e campo livre de um microfone projetado para medir em campo de pressão.

Desta forma, um microfone pode ser projetado para medir em um determinado tipo de campo sonoro, tendo resposta em frequência plana neste campo. Assim, um microfone projetado para medir em campo de pressão terá resposta plana em campo de pressão e para isso seu diafragma terá pouco amortecimento. Um microfone projetado para medir em campo difuso terá resposta plana em campo difuso e para isto seu diafragma terá um pouco mais de amortecimento. Finalmente, um microfone projetado para medir em campo livre terá resposta plana em campo livre e para isto seu diafragma terá um forte amortecimento.

2.2 Calibração Secundária

2.2.1 Por Atuador Eletrostático

Segundo a norma internacional IEC 61094-6 [9], o atuador eletrostático é um dispositivo para a determinação da resposta em frequência de um microfone. Ele é constituído de uma placa fixa, condutora de eletricidade, posicionada próxima ao diafragma do microfone. Variando-se a tensão aplicada entre o atuador e o diafragma, produz-se uma força eletrostática distribuída sobre a superfície do diafragma, que corresponde à pressão eletrostática p_{act} :

$$p_{act} = \frac{F_{act}}{S_{dia}} = -\frac{\epsilon_{gas}}{2d_{ad}^2} a_s U_{ad}^2 \quad (2.1)$$

onde

F_{act}	é a força eletrostática;
S_{dia}	é área ativa do diafragma;
ϵ_{gas}	é a constante dielétrica do gás no espaço entre o atuador e o diafragma;
d_{ad}	é a distância efetiva entre o atuador e o diafragma;
a_s	é a razão entre a área efetiva do atuador e a área ativa do diafragma;
U_{ad}	é a tensão aplicada entre o atuador e o diafragma.

Como, geralmente, o atuador opera com uma tensão alternada superposta a uma tensão contínua, a Equação (2.1) assume a seguinte forma:

$$p_{act} = -\frac{\epsilon_{gas}}{2d_{ad}^2} a_s (U_0 + u\sqrt{2}\text{sen}(\omega t))^2 \quad (2.2)$$

onde

- U_0 é a tensão contínua aplicada entre o atuador e o diafragma;
- u é tensão alternada (eficaz) aplicada entre o atuador e o diafragma;
- ω é a frequência angular;
- t é o tempo.

Segundo FREDERIKSEN [10], a pressão eletrostática gerada é, tipicamente, entre 0,3 Pa e 3 Pa, a qual corresponde a um nível de pressão sonora entre 84 dB e 104 dB. É muito difícil, entretanto, determinar o valor dessa pressão eletrostática com uma baixa incerteza de medição, por isso o atuador é utilizado apenas para determinar a resposta em frequência do microfone. A determinação da sensibilidade é feita, em uma única frequência, através da técnica da inserção de tensão utilizando como padrão de referência um pistonefone, ou através de calibração por comparação. As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram etapas da calibração de um microfone por atuador eletrostático.



Figura 2.2 – Montagem para a determinação da resposta em frequência com o atuador eletrostático (Inmetro).



Figura 2.3 – Montagem para a determinação da sensibilidade utilizando um pistonfone (Inmetro).

Após a determinação da resposta em frequência e a determinação da sensibilidade é necessária a aplicação de correções para se obter a sensibilidade em campo de pressão, em campo livre ou em campo difuso. Essas correções consideram a influência do tipo de campo sonoro no qual o microfone será utilizado.

A incerteza expandida de medição é obtida pela multiplicação da incerteza padrão por um fator de abrangência. Para esta calibração (considerando a não aplicação de correções para o campo sonoro desejado), a incerteza expandida de medição, baseada num fator de abrangência igual a 2, é tipicamente de 0,2 dB nas baixas e médias frequências aumentando para até 0,8 dB nas altas frequências, para um nível de confiança de 95%.

2.2.2 Por Comparação

A calibração por comparação consiste em expor o microfone sob calibração e o microfone de referência à mesma pressão sonora, simultaneamente (calibração por comparação simultânea) ou seqüencialmente (calibração por comparação seqüencial), medindo-se os níveis de pressão sonora com o microfone sob calibração e com o microfone de referência. Com estes níveis e o nível de sensibilidade do microfone de referência é possível calcular o nível de sensibilidade do microfone sob calibração, M_s , de acordo com:

$$M_t = M_{ref} + L_t - L_{ref} \quad (2.3)$$

onde M_{ref} , L_t e L_{ref} são, respectivamente, o nível de sensibilidade do microfone de referência e os níveis de pressão sonora medidos com o microfone sob calibração e o com o microfone de referência.

WONG e EMBLETON [11] apontam que nem sempre todo erro sistemático na calibração por comparação será eliminado pela subtração envolvendo os níveis de pressão sonora medidos. Se, por exemplo, os microfones tiverem capacitâncias diferentes, a Equação (2.3) deverá incluir a correção, ΔP_c , dada por:

$$\Delta P_c = 20 \log \left(\frac{C_{ref}}{C_{ref} + C_i} \right) - 20 \log \left(\frac{C_t}{C_t + C_i} \right) \quad (2.4)$$

onde C_{ref} , C_i e C_t são, respectivamente, a capacitância do microfone de referência, a capacitância de entrada do pré-amplificador e a capacitância do microfone sob calibração.

a) Comparação em Campo de Pressão

Na calibração por comparação em campo de pressão o acoplamento acústico dos microfones (acoplamento microfone-campo-microfone) pode ser feito com um dispositivo chamado acoplador ou com um *jig*. O *jig* é um dispositivo que permite posicionar os diafragmas dos microfones face-a-face, separados por uma pequena distância, mas que não cria uma cavidade fechada, como acontece com o acoplador. As Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 ilustram as calibrações por comparação em campo de pressão.

Segundo a IEC 61094-5 [7], na calibração simultânea, os diafragmas deverão estar separados por uma distância menor que 1/10 do comprimento de onda da maior frequência de interesse. Já na calibração seqüencial, é importante garantir que a troca dos microfones não modifique o volume da cavidade fechada formada pelo conjunto microfone-acoplador-microfone e conseqüentemente, não modifique a pressão sonora de excitação.



Figura 2.4 – Montagem para calibração por comparação simultânea em campo de pressão utilizando um *jig* (Inmetro).



Figura 2.5 – Montagem para calibração por comparação simultânea em campo de pressão utilizando um acoplador (Inmetro).



Figura 2.6 – Montagem para calibração por comparação seqüencial em campo de pressão utilizando um acoplador (Inmetro).

A incerteza expandida de medição típica para estas calibrações, baseada num fator de abrangência igual a 2, é de 0,2 dB nas baixas e médias frequências aumentando para até 0,3 dB nas altas frequências, para um nível de confiança de 95%.

b) Comparação em Campo Difuso

A calibração de microfones por comparação em campo difuso é feita a partir de uma adaptação à proposta da norma internacional IEC 61183 que trata da calibração de medidores de nível sonoro em campo difuso [12].

A calibração de medidor de nível sonoro por comparação em campo difuso é feita em câmara reverberante, de forma seqüencial ou de forma simultânea.

Se o medidor de nível sonoro de referência for calibrado em campo livre e os seus fatores de direcionalidade forem conhecidos, o nível de sensibilidade em campo difuso do medidor de nível sonoro sob calibração, G_D , deverá ser calculado de acordo com:

$$G_D = L_D - L_{D,ref} + G_{F,ref} - 10 \log \gamma_{ref} \quad (2.5)$$

onde

L_D é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro sob calibração;

$L_{D,ref}$ é o nível de pressão sonora indicado pelo medidor de nível sonoro de referência;

$G_{F,ref}$ é o nível de sensibilidade em campo livre do medidor de nível sonoro de referência para uma direção de referência da incidência da onda sonora;

γ_{ref} é o fator de direcionalidade para o medidor de nível sonoro de referência.

Se o medidor de nível sonoro de referência for calibrado em campo de pressão e as diferenças entre os níveis de sensibilidade em campo difuso e em campo de pressão forem conhecidos, o nível de sensibilidade em campo difuso do medidor de nível sonoro sob calibração deverá ser calculado de acordo com:

$$G_D = L_D - L_{D,ref} + G_{P,ref} + \Delta_{DP} \quad (2.6)$$

onde $G_{P,ref}$ é o nível de sensibilidade em campo de pressão do medidor de nível sonoro de referência e Δ_{DP} é a diferença entre o nível de sensibilidade em campo difuso e em campo de pressão para o medidor de nível sonoro de referência.

A fim de se conseguir difusão suficiente na câmara reverberante é necessário que os microfones dos medidores de nível sonoro de referência e sob calibração movam-se ao longo de um círculo, não paralelo a qualquer superfície da câmara reverberante e de raio maior que 1 m ou três vezes maior que a maior dimensão do medidor de nível sonoro. Para melhorar esta difusão, devem ser usadas, ao mesmo tempo, duas fontes sonoras de igual potência sonora para todas as bandas de frequência. Deve-se ainda assegurar que sejam utilizados longos tempos de integração para as medições [13].

Para a calibração de microfones por comparação em campo difuso, substituem-se os níveis de pressão sonora indicados pelos medidores de nível sonoro sob calibração e de referência e o nível de sensibilidade do medidor de nível sonoro de referência nas Equações (2.5) e (2.6) pelos níveis de pressão sonora medidos com os microfones sob calibração e de referência e pelo nível de sensibilidade do microfone de referência. A Figura 2.7 apresenta um esquema da calibração por comparação em campo difuso.

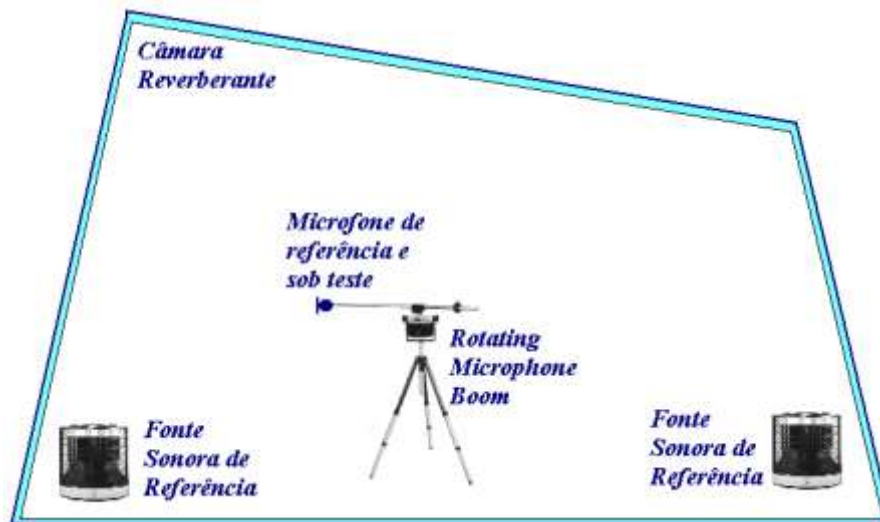


Figura 2.7 – Esquema da calibração por comparação sequencial em campo difuso segundo uma adaptação à proposta da IEC 61183 [12].

SOARES [12] apresenta, entretanto, um novo método para calibração de microfones por comparação em campo difuso. Neste método a sensibilidade do

microfone é determinada utilizando a resposta impulsiva em conjunto com a aplicação de uma função janela, o que diminui o número de equipamentos necessários e o tempo de calibração.

c) Comparação em Campo Livre

Na calibração por comparação em campo livre os microfones são acoplados acusticamente por meio de uma câmara anecóica. Entretanto, SOARES [12] também apresenta um novo método de calibração por comparação em campo livre em que os microfones são colocados em um ambiente qualquer e utiliza-se também a resposta impulsiva em conjunto com a aplicação de uma função janela para se determinar a sensibilidade em campo livre. Este método é chamado de calibração por comparação seqüencial em campo livre simulado. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram a calibração por comparação em campo livre.



Figura 2.8 – Montagem para a calibração por comparação seqüencial em campo livre (Inmetro).



Figura 2.9 – Montagem para a calibração por comparação seqüencial em campo livre simulado (PTB) [12].

Segundo SOARES [12], para o dois métodos, a haste que sustenta o pré-amplificador e o microfone deve ter o comprimento mínimo estabelecido na IEC 61094-3 e deve estar posicionada perpendicularmente em relação à superfície do alto-falante, com seu eixo de simetria coincidindo com o eixo de simetria do alto-falante; o diafragma do microfone deve estar a 1 m de distância do alto-falante com os objetivos de diminuir o erro provocado por não se posicionar o microfone na exata distância entre os centros acústicos do microfone e do alto-falante e de satisfazer a condição de campo afastado ($k_0 d \gg 1$, onde k_0 é o número de onda e d a distância). Com 1 m de distância se garante a condição de campo afastado para frequências acima de 630 Hz, o que é suficiente, uma vez que a sensibilidade em campo livre é igual às sensibilidades em campo de pressão e em campo difuso para frequências abaixo de 630 Hz, para microfones de 1", e para frequências abaixo de 800 Hz, para microfones de ½".

Segundo o documento IEC 61094-8 [14], na comparação seqüencial é importante garantir que a pressão sonora de excitação e que as condições ambientais no campo sonoro não mudem durante as medições com os microfones sob calibração e de referência. Já na calibração simultânea, não existe esta preocupação, entretanto, deve-se encontrar no campo sonoro, dentro de um mesmo plano paralelo à superfície do diafragma do microfone, pontos onde a pressão sonora seja a mesma. É importante também que a presença de um microfone não interfira nas ondas sonoras que atingem o outro e vice-versa.

A incerteza expandida de medição para esta calibração, baseada num fator de abrangência igual a 2, é de 0,5 dB nas baixas e médias frequências aumentando para até 0,6 dB nas altas frequências, para um nível de confiança de 95%.

2.3 Calibração Primária

2.3.1 Por Reciprocidade

A calibração por reciprocidade pode ser realizada com dois microfones, um dos quais deverá ser recíproco (isto é, pode ser utilizado tanto como receptor sonoro quanto como fonte sonora), e uma fonte sonora auxiliar; ou com três microfones, dois dos quais deverão ser recíprocos.

A calibração por reciprocidade com dois microfones é realizada em duas etapas. Na primeira etapa mantêm-se os dois microfones, microfones 1 e 2, acoplados acusticamente. Utilizando o microfone 1 como fonte sonora e o microfone 2 como receptor sonoro, determina-se a impedância de transferência elétrica (complexa) entre os microfones 1 e 2:

$$\underline{Z}_{e,12} = \frac{\underline{U}_{r,2}}{\underline{i}_{t,1}} \quad (2.7)$$

onde $\underline{Z}_{e,ij}$ é a impedância de transferência elétrica (complexa) entre os microfones i e j , $\underline{U}_{r,j}$ é a tensão de circuito aberto (complexa) no microfone j utilizado como receptor sonoro e $\underline{i}_{t,i}$ é a corrente de entrada (complexa) no terminal elétrico do microfone i utilizado como fonte sonora.

Quando a impedância de transferência acústica (complexa), que é função do acoplamento acústico entre os dois microfones, é conhecida, o produto das sensibilidades (complexa) dos microfones 1 e 2 pode ser determinado por:

$$\underline{M}_1 \underline{M}_2 = \frac{\underline{Z}_{e,12}}{\underline{Z}_{a,12}} \quad (2.8)$$

onde \underline{M}_i é a sensibilidade (complexa) do microfone i e $\underline{Z}_{a,ij}$ é a impedância de transferência acústica (complexa) entre os microfones i e j . A impedância de transferência acústica será discutida mais adiante.

Na segunda etapa, os dois microfones são expostos à mesma pressão sonora usando-se uma fonte sonora auxiliar, que pode ser um calibrador de nível sonoro, por exemplo. A razão entre as duas tensões de saída será igual à razão entre as sensibilidades dos dois microfones. Usando as equações do produto e da razão das sensibilidades dos microfones pode-se calcular a sensibilidade de cada um dos microfones envolvidos. Assim, o módulo da sensibilidade para o microfone 1 é obtido por:

$$M_1 = \left(\frac{U_1 Z_{e,12}}{U_2 Z_{a,12}} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

onde

M_i é o módulo da sensibilidade para o microfone i ;

U_i é a tensão de saída do microfone i ;

$Z_{e,ij}$ é o módulo da impedância de transferência elétrica entre os microfones i e j ;

$Z_{a,ij}$ é o módulo da impedância de transferência acústica entre os microfones i e j .

Apesar da calibração por reciprocidade permitir o cálculo da magnitude e da fase da sensibilidade, até o momento *“somente a magnitude da sensibilidade é o objeto dos laboratórios que realizam este método”*; *“a fase do microfone somente é de interesse quando se deseja calibrar um par de microfones para uma sonda intensimétrica, sendo a fase determinada utilizando-se um método que não necessita de um microfone padrão”* [12].

A calibração por reciprocidade utilizando três microfones é realizada em três etapas. Na primeira etapa mantêm-se dois microfones, microfones 1 e 2, acoplados acusticamente. Utilizando o microfone 1 como fonte sonora e o microfone 2 como

receptor sonoro, determina-se o produto das sensibilidades dos microfones 1 e 2 como na Equação (2.8).

Na segunda etapa, substitui-se o microfone 2 pelo terceiro microfone, microfone 3, e repete-se o procedimento descrito acima utilizando o microfone 1 como fonte sonora e o microfone 3 como receptor sonoro. Na terceira etapa, substitui-se o microfone 1 pelo microfone 2 e novamente repete-se o procedimento, utilizando agora o microfone 2 como fonte sonora e o microfone 3 como receptor sonoro. A Figura 2.10 ilustra cada uma dessas etapas.

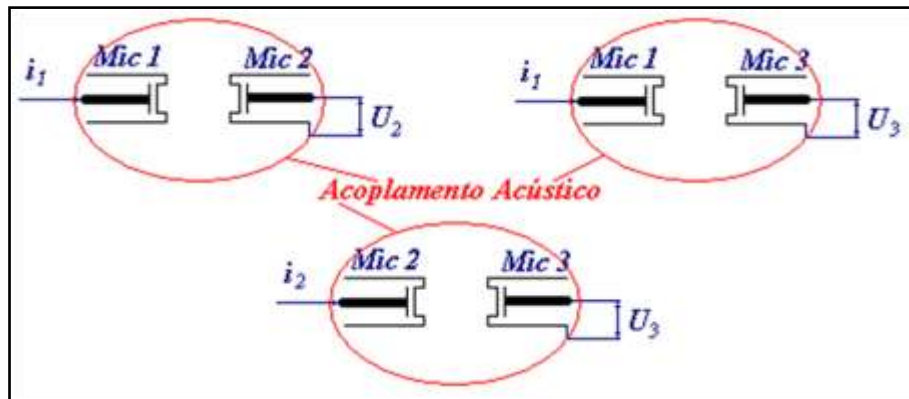


Figura 2.10 – Esquema da calibração por reciprocidade [12].

Ao final dessas etapas, obtém-se um sistema de três equações independentes (referentes aos produtos $\underline{M}_1\underline{M}_2$, $\underline{M}_1\underline{M}_3$, $\underline{M}_2\underline{M}_3$) e três incógnitas (\underline{M}_1 , \underline{M}_2 , \underline{M}_3), e pode-se calcular cada uma das sensibilidades dos microfones envolvidos. Assim, o módulo da sensibilidade para o microfone 1 é obtido por:

$$M_1 = \left(\frac{Z_{e,13}Z_{e,12}}{Z_{e,23}} \frac{Z_{a,23}}{Z_{a,12}Z_{a,13}} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

No decorrer deste trabalho será considerada a calibração por reciprocidade utilizando-se três microfones.

A seguir são apresentadas as calibrações por reciprocidade nos campos de pressão, difuso e livre.

a) Reciprocidade em Campo de Pressão

Na calibração por reciprocidade em campo de pressão, o acoplamento acústico dos microfones é feito utilizando um acoplador que, junto com os microfones, cria uma cavidade fechada, de dimensões conhecidas e preenchida com gás, normalmente o ar. A Figura 2.11 ilustra a calibração por reciprocidade em campo de pressão.



Figura 2.11 – Montagem para a calibração por reciprocidade em campo de pressão (Inmetro).

A impedância de transferência acústica pode ser determinada pelas impedâncias acústicas dos microfones envolvidos e pela impedância característica do meio. Segundo a IEC 61094-2 [1], assumindo que a pressão sonora é a mesma em qualquer ponto dentro do acoplador, o que só ocorre quando as dimensões do acoplador são muito pequenas comparadas com o comprimento de onda, a impedância de transferência acústica (complexa) entre os microfones 1 e 2 é dada por:

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (2.11)$$

onde

$Z_{a,V}$ é a impedância acústica (complexa) do gás que preenche o acoplador;

$\underline{Z}_{a,i}$ é a impedância acústica (complexa) do microfone i ;
 j = $\sqrt{-1}$;
 κ é a razão entre calores específicos do gás nas condições de medição;
 p_s é a pressão estática nas condições de medição;
 V é o volume total da cavidade;
 κ_r é a razão entre calores específicos do gás nas condições de referência;
 $p_{s,r}$ é a pressão estática nas condições de referência;
 $\underline{V}_{e,i}$ é o volume equivalente (complexo) do diafragma do microfone i . O volume equivalente do diafragma é o volume de ar que possui a mesma impedância acústica que o diafragma. O uso do volume equivalente ao invés da impedância do diafragma torna mais fácil a avaliação da influência do microfone no campo sonoro em sistemas acústicos de pequenas dimensões, como os formados por acopladores.

Para frequências altas, quando as dimensões do acoplador não são suficientemente pequenas comparadas com o comprimento de onda, a determinação da impedância de transferência acústica se torna mais complicada. Entretanto, segundo a IEC 61094-2 [1], se a forma do acoplador for cilíndrica e o diâmetro for igual ao dos diafragmas dos microfones então, nas frequências em que se puder assumir a propagação de ondas planas, a impedância de transferência acústica (complexa) entre os microfones 1 e 2 é dada por:

$$\frac{1}{\underline{Z}_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,0}} \left[\left(\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \cosh(\underline{\gamma}l_0) + \left(1 + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \sinh(\underline{\gamma}l_0) \right] \quad (2.12)$$

onde

$\underline{Z}_{a,0}$ é a impedância acústica (complexa) do acoplador;
 $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ é o número de onda complexo, sendo α o coeficiente de absorção do som pelo ar e β o coeficiente de perda termo-viscosa;
 l_0 é o comprimento da cavidade.

Para frequências baixas, o gás que preenche o acoplador se comporta como uma compliância pura, de forma que, no modelo elétrico, as impedâncias dos microfones e do gás comportam-se como capacitâncias em série. Neste caso, os principais parâmetros

para determinar a impedância de transferência acústica são os volumes equivalentes dos microfones e o volume total da cavidade (que inclui o volume frontal da cavidade dos microfones) conforme mostra a Equação (2.11). Para frequências altas, o conjunto microfone-acoplador-microfone se comporta com uma linha de transmissão homogênea. Neste caso, os principais parâmetros para determinar a impedância de transferência acústica são a área da seção transversal do acoplador e o comprimento da cavidade (que inclui a profundidade da cavidade frontal dos microfones além do comprimento do acoplador) conforme mostra a Equação (2.12).

A incerteza expandida de medição típica para esta calibração, baseada num fator de abrangência igual a 2, é de 0,05 dB nas baixas e médias frequências aumentando para até 0,15 dB nas altas frequências, para um nível de confiança de 95%.

b) Reciprocidade em Campo Difuso

Segundo FREDERIKSEN [10], a calibração por reciprocidade em campo difuso é impossível (ou muito difícil), pois o ruído torna o método impraticável.

c) Reciprocidade em Campo Livre

Na calibração por reciprocidade em campo livre os microfones são acoplados acusticamente por meio de uma câmara anecóica que cria as condições de campo livre. A Figura 2.12 apresenta um esquema da calibração por reciprocidade em campo livre.

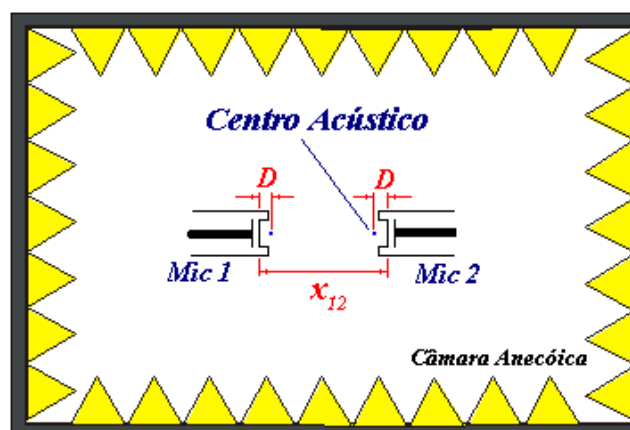


Figura 2.12 – Esquema da calibração por reciprocidade em campo livre. (x_{12} é a distância entre os diafragmas dos microfones 1 e 2, D é a posição do centro acústico em relação ao diafragma) [12].

Novamente, a impedância de transferência acústica pode ser determinada pelas impedâncias acústicas dos microfones envolvidos e pela impedância característica do meio. Modelando-se o microfone 1 como uma fonte sonora monopolar que irradia ondas sonoras em campo livre, assumindo-se que esta fonte é pontual ($k_0 r \rightarrow 0$, onde r é o raio da fonte) e assumindo-se que o microfone 2 está na condição de campo afastado ($k_0 d \gg 1$), então o módulo da impedância de transferência acústica entre os microfones 1 e 2 é dado por [12]:

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{2}{\rho f} d_{12} e^{\alpha d_{12}} \quad (2.13)$$

onde

- ρ é a densidade do ar;
- f é a frequência de excitação;
- d_{ij} é a distância entre os centros acústicos dos microfones i e j ;
- α é o coeficiente de absorção do som pelo ar.

Para baixas frequências, a tensão a ser medida no terminal elétrico do microfone utilizado como receptor sonoro é muito baixa comparada com os ruídos elétricos do próprio microfone e do pré-amplificador. Isso impossibilita as medições para frequências abaixo de 630 Hz e 1000 Hz, respectivamente, para microfones LS1 e LS2. No próximo capítulo este assunto será discutido em detalhes.

A incerteza expandida de medição típica para esta calibração, baseada num fator de abrangência igual a 2, é de 0,12 dB nas médias frequências aumentando para até 0,18 dB nas altas frequências, para um nível de confiança de 95%.

CAPÍTULO 3

CALIBRAÇÃO DE MICROFONES LS2 POR RECIPROCIDADE EM CAMPO LIVRE

3.1 Introdução

A sensibilidade dos microfones é calculada a partir da impedância de transferência acústica e da impedância de transferência elétrica. A impedância de transferência acústica é determinada a partir das impedâncias acústicas dos microfones envolvidos e da impedância característica do meio. A impedância de transferência elétrica é determinada a partir da tensão de circuito aberto no microfone utilizado como receptor sonoro (microfone receptor) e da corrente de entrada no terminal elétrico do microfone utilizado como fonte sonora (microfone fonte). Os próximos itens apresentam em detalhes como é calculada a sensibilidade em campo livre; apresentam também os procedimentos para a determinação da impedância de transferência acústica e introduzem a determinação da impedância de transferência elétrica.

3.2 Cálculo das Sensibilidades

Como visto no Capítulo 2, os produtos das sensibilidades (complexas), $\underline{M}_1\underline{M}_2$, $\underline{M}_1\underline{M}_3$ e $\underline{M}_2\underline{M}_3$, podem ser determinados por:

$$\underline{M}_i\underline{M}_j = \frac{\underline{Z}_{e,ij}}{\underline{Z}_{a,ij}} \quad (3.1)$$

Os módulos destes produtos, M_1M_2 , M_1M_3 e M_2M_3 , podem ser determinados por:

$$M_iM_j = \frac{Z_{e,ij}}{Z_{a,ij}} \quad (3.2)$$

A partir das equações para M_1M_2 e M_1M_3 , obtemos:

$$M_3 = \frac{Z_{e,13} Z_{a,12}}{Z_{a,13} Z_{e,12}} M_2 \quad (3.3)$$

A partir de (3.3) e da equação para $M_2 M_3$, obtemos:

$$M_2 = \left(\frac{Z_{e,23} Z_{a,13} Z_{e,12}}{Z_{a,23} Z_{e,13} Z_{a,12}} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

A partir de (3.4) e da equação para $M_2 M_3$, obtemos:

$$M_3 = \left(\frac{Z_{e,23} Z_{e,13} Z_{a,12}}{Z_{a,23} Z_{a,13} Z_{e,12}} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Finalmente, partir de (3.4) e da equação para $M_1 M_2$, obtemos:

$$M_1 = \left(\frac{Z_{e,12} Z_{a,23} Z_{e,13}}{Z_{a,12} Z_{e,23} Z_{a,13}} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Sabendo que o módulo da impedância de transferência acústica em campo livre entre os microfones i e j é determinado por:

$$\frac{1}{Z_{a,ij}} = \frac{2}{\rho f} d_{ij} e^{\alpha d_{ij}} \quad (3.7)$$

e que o módulo da impedância de transferência elétrica entre os microfones i e j é determinado por:

$$Z_{e,ij} = \frac{U_{r,j}}{i_{t,i}} \quad (3.8)$$

onde $U_{r,j}$ é o módulo da tensão de circuito aberto no microfone receptor j e $i_{t,i}$ é o módulo da corrente de entrada no terminal elétrico do microfone fonte i .

Substituindo (3.7) e (3.8) em (3.6) e re-arranjando, obtemos a sensibilidade em campo livre para o microfone 1, $M_{f,1}$:

$$M_{f,1} = \left[\frac{2 U_{r,2} U_{r,3} i_{t,2} d_{12} d_{13}}{\rho f i_{t,1} i_{t,1} U_{r,3} d_{23}} e^{\alpha(d_{12}+d_{13}-d_{23})} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

De forma análoga, as sensibilidades em campo livre dos microfones 2 e 3, $M_{f,2}$ e $M_{f,3}$, são dadas por:

$$M_{f,2} = \left[\frac{2 U_{r,3} U_{r,2} i_{t,1} d_{23} d_{12}}{\rho f i_{t,2} i_{t,1} U_{r,3} d_{13}} e^{\alpha(d_{23}+d_{12}-d_{13})} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

$$M_{f,3} = \left[\frac{2 U_{r,3} U_{r,3} i_{t,1} d_{23} d_{13}}{\rho f i_{t,2} i_{t,1} U_{r,2} d_{12}} e^{\alpha(d_{23}+d_{13}-d_{12})} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

Para obter a sensibilidade em dB referenciada a 1 V/Pa, M_{dB} , utiliza-se:

$$M_{dB} = 20 \log \left(\frac{M_i}{1 \text{ V/Pa}} \right) \quad (3.12)$$

3.2.1 Correção da Sensibilidade para as Condições Ambientais de Referência

A influência das condições ambientais na sensibilidade em campo livre é composta da influência das condições ambientais na sensibilidade em campo de pressão, na impedância de radiação e na difração ao redor do microfone [4,15]. Embora a IEC 61094-3 apresente, sob a forma de gráficos, os coeficientes para pressão estática e para temperatura referentes à sensibilidade em campo livre, como estes coeficientes dependem de detalhes de construção de cada microfone, a IEC 61094-3 explicita que estes coeficientes não deverão ser aplicados.

Como segundo a IEC 61094-3[4] a influência das condições ambientais na impedância de radiação e na difração ao redor do microfone irá mudar apenas “levemente” os coeficientes para pressão estática e temperatura referentes à sensibilidade em campo de pressão e como ainda não estão disponíveis os coeficientes

para pressão estática e temperatura referentes à sensibilidade em campo livre [15], aplica-se os coeficientes para pressão estática e temperatura referentes à sensibilidade em campo de pressão para se obter a sensibilidade nas condições ambientais de referência.

Segundo RASMUSSEN [16], os coeficientes para pressão estática, δ_p , e para temperatura δ_T , referentes à sensibilidade em campo de pressão são calculados por:

$$\delta = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_9x^9 \quad (3.13)$$

onde δ representa δ_p ou δ_T , a_i são constantes polinomiais e $x = f/f_0$ é a frequência (f) normalizada pela frequência de ressonância (f_0) do microfone.

A constante polinomial a_0 representa o valor do coeficiente para baixas frequências. Deve-se utilizar, preferencialmente, o valor individual do coeficiente para baixas frequências de cada microfone. Caso ele não seja conhecido, deve-se utilizar o valor tabelado. Da mesma forma, deve-se utilizar, preferencialmente, o valor individual da frequência de ressonância de cada microfone. Caso ele não seja conhecido, RASMUSSEN [16] apresenta para os microfones LS2 fabricados pela Brüel & Kjaer, modelo 4180 (B&K 4180), o valor 22,34 kHz \pm 1,68 kHz. A Tabela 3.1 apresenta os módulos das constantes polinomiais.

A Equação (3.13) só é válida para uma faixa de frequência limitada que depende do modelo do microfone. Para os microfones LS2, B&K 4180, o limite superior é 35 kHz [16].

Também segundo RASMUSSEN [16] uma mudança de aproximadamente 30% na umidade relativa resulta em uma mudança equivalente a variação de 1 °C para a temperatura.

A correção da sensibilidade do microfone para as condições ambientais de referência é realizada segundo:

$$M_{dB,ref} = M_{dB,cm} + \delta_p(p_{s,r} - p_s) + \delta_T(T_r - T) \quad (3.14)$$

onde

$M_{dB,ref}$ é a sensibilidade, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de referência;

$M_{dB,cm}$ é a sensibilidade, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de medição;

T_r é a temperatura termodinâmica nas condições de referência;

T é a temperatura termodinâmica nas condições de medição.

A incerteza desta correção é determinada pelas incertezas dos valores dos coeficientes para baixas frequências e da frequência de ressonância [16].

Tabela 3.1 – Módulos das constantes polinomiais dos coeficientes para pressão estática e para temperatura referentes à sensibilidade em campo de pressão para microfones LS2, B&K 4180 [16].

Constantes	δ_p (dB/kPa)	δ_T (dB/K)
a_0	$-0,005\ 19 \pm 0,001\ 2$	$-0,001\ 2 \pm 0,002\ 3$
a_1	$-0,030\ 4$	$0,006\ 33$
a_2	$0,597\ 6$	$-0,242$
a_3	$-3,912$	$1,656$
a_4	$14,139$	$-6,183\ 3$
a_5	$-27,561$	$11,81$
a_6	$29,574$	$-12,136\ 6$
a_7	$-17,632\ 5$	$6,875$
a_8	$5,499\ 7$	$-2,032\ 4$
a_9	$-0,701\ 7$	$0,245\ 7$

3.3 Determinação da Impedância de Transferência Acústica

Segundo a IEC 61094-2 [4], para minimizar a influência da impedância de transferência acústica na incerteza da medição da sensibilidade do microfone, os fatores que a compõem (ver Equação (3.7)) devem ser calculados com o maior grau de exatidão possível. Portanto, serão discutidos adiante os cálculos da densidade do ar, do

coeficiente de absorção do som pelo ar e da distância entre os centros acústicos dos microfones.

3.3.1 Densidade do Ar

O documento 29/WG5/WD8-07/06 [17] apresenta, no seu anexo F, o procedimento de cálculo da densidade do ar segundo DAVIS [18], seguindo a recomendação do *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM). Este procedimento é descrito no Apêndice A. A incerteza relativa da equação para densidade do ar (válida para uma faixa restrita de condições ambientais) é estimada em 10^{-4} . A Tabela 3.2 apresenta alguns valores para condições ambientais específicas.

Tabela 3.2 – Valores para a densidade do ar.

Condições ambientais	Densidade do ar (kg/m^3)
$t_c = 23^\circ\text{C}$, $p_s = 101\,325\text{ Pa}$, $H = 50\%$	1,186 0
$t_c = 20^\circ\text{C}$, $p_s = 80\,000\text{ Pa}$, $H = 65\%$	0,944 1

onde t_c é a temperatura Celsius e H é a umidade relativa.

3.3.2 Coeficiente de Absorção do Som pelo Ar

Segundo a IEC 61094-3 [4], as ondas sonoras ao se propagarem em campo livre são atenuadas devido ao efeito de relaxamento molecular e as perdas termo-viscosas. Esta atenuação é determinada pelo coeficiente de absorção do som pelo ar e depende da frequência, da quantidade de vapor d'água e temperatura do ar. A IEC 61094-3 [4] apresenta, no seu anexo B, o procedimento de cálculo do coeficiente de absorção do som pelo ar segundo a norma internacional ISO 9613-1 [19]. Este procedimento é descrito no Apêndice B. A exatidão deste cálculo é estimada em $\pm 10\%$ (para uma faixa restrita de condições ambientais). A Tabela 3.3 apresenta alguns valores para condições ambientais e frequências específicas.

Tabela 3.3 – Valores para o coeficiente de absorção do som no ar.

Condições ambientais: $t_c = 23,0\text{ °C}$, $p_s = 101,325\text{ kPa}$, $H = 50\%$	
Frequência (kHz)	Coef. de absorção do som no ar (Np/m)
1,0	0,000 601
2,0	0,001 144
4,0	0,003 115
8,0	0,010 739
10,0	0,016 249
20,0	0,056 424
40,0	0,158 817

3.3.3 Distância entre os Centros Acústicos dos Microfones

A IEC 61094-3 [4] define o centro acústico como o ponto a partir do qual frentes de ondas esféricas parecem se originar. Ela faz ainda duas observações: primeira, que a posição do centro acústico de um transdutor recíproco independe da sua utilização, sendo a mesma quando o transdutor é usado como receptor ou como fonte sonora; segunda, que esta definição somente se aplica em regiões do campo sonoro onde são observadas frentes de ondas esféricas, ou aproximadamente esféricas. Outras referências definem o centro acústico como o ponto a partir do qual a pressão sonora varia inversamente com a distância [20].

Segundo WAGNER e NEDZELNITSKY [21], as calibrações em campo livre são normalmente realizadas com incidência normal, com o microfone fonte e o microfone receptor dispostos face-a-face, com o eixo principal passando pelo centro dos microfones e perpendicular aos seus diafragmas. Para esta disposição, o centro acústico de cada microfone fica localizado a uma distância do diafragma ao longo do eixo principal. Se os microfones forem idênticos, essa distância será a mesma para os dois microfones.

A exatidão com que o centro acústico é determinado tem grande influência na exatidão com que a sensibilidade em campo livre é calculada. Segundo WAGNER e NEDZELNITSKY [21], para uma distância entre os microfones de 200 mm, um erro de 2 mm na posição do centro acústico de cada microfone, cujo valor nominal é também 2 mm, resultará num erro de 0,09 dB na sensibilidade em campo livre de cada microfone. Para muitos modelos de microfones, uma componente de incerteza desta

magnitude irá prevalecer na incerteza de medição da sensibilidade em campo livre em várias frequências. Segundo BARRERA-FIGUEROA *et al* [22], uma mudança de 1 mm na posição do centro acústico levará a uma mudança de 0,03 dB na sensibilidade em campo livre, para medições realizadas em uma distância média entre os microfones de 300 mm.

Segundo a IEC 61094-3 [4], o centro acústico do microfone pode ser determinado, em campo livre, a partir de medições da pressão sonora como função da distância a um ponto arbitrário no microfone. Numa região limitada do campo afastado, a pressão sonora, corrigida para os efeitos de absorção do som pelo ar, irá seguir a lei do inverso da distância, sendo a distância referenciada ao centro acústico do microfone. Assim, construindo um gráfico do inverso da pressão sonora medida como função da distância a um ponto arbitrário no microfone (mais convenientemente o centro do diafragma), uma linha reta pode ser determinada (através do método dos mínimos quadrados, por exemplo). A interseção desta reta com o eixo da abscissa determina a posição do centro acústico em relação ao ponto de referência.

A IEC 61094-3 também apresenta, em seu anexo A, valores para a posição do centro acústico para cada da frequência, para microfones LS1 e LS2. Esses valores são referenciados ao eixo principal e à superfície do diafragma. Um valor positivo indica que o centro acústico está à frente da superfície do microfone, enquanto que um valor negativo indica que ele está atrás. A incerteza estimada destes valores é menor que 2 mm para frequências abaixo da frequência de ressonância do microfone. A Tabela 3.4 contém os valores para a posição do centro acústico apresentados pela IEC 61094-3 para microfones LS2.

Tabela 3.4 – Valores para a posição do centro acústico para microfones LS2 (referenciados ao diafragma) [4].

Frequência (kHz)	Posição (mm)
1,0	5,0
1,25	4,9
1,6	4,8
2,0	4,7
2,5	4,4
3,15	4,2
4,0	3,9
5,0	3,6
6,3	3,2
8,0	2,8
10,0	2,3
12,5	1,8
16,0	1,2
20,0	0,5

Seguindo a proposta da IEC 61094-3, WAGNER e NEDZELNITSKY [21], apresentam um procedimento para determinar o centro acústico.

Para um receptor, no campo afastado de uma fonte gerando ondas esféricas divergentes que se aproximam de ondas planas na região de interesse, em campo livre e em condições ambientais ideais, a amplitude da pressão sonora no centro acústico do receptor é inversamente proporcional à distância. Esta relação é utilizada para determinar a soma das posições dos centros acústicos dos microfones. Nestas condições, a amplitude da pressão sonora, A_p , é dada por:

$$A_p = \frac{B}{d_{ij}} = \frac{B}{(x_{ij} - 2D)} \quad (3.15)$$

onde

B é uma constante de proporcionalidade linear;

d_{ij} é a distância entre os centros acústicos dos microfones i e j ;

x_{ij} é a distância entre os diafragmas dos microfones i e j ;

D é a posição do centro acústico em relação ao diafragma.

Para uma dada frequência, a pressão sonora produzida pela fonte é diretamente proporcional a tensão em sua entrada; a tensão na saída do receptor é diretamente proporcional a pressão sonora no seu centro acústico. Esta relação permite a determinação da posição do centro acústico a partir de um fator de ganho $|H(f)|$ dado por:

$$|H(f)| = \frac{|H(f)|_m \exp(\alpha x_{ij})}{(T_r/T)(p_s/p_{s,r})} = \frac{C}{(x_{ij} - 2D)} \quad (3.16)$$

onde $|H(f)|_m$ é o fator de ganho medido, dado pela razão entre a tensão na saída do receptor e a tensão na entrada da fonte; C é uma constante de proporcionalidade linear ($\neq B$).

O inverso de (3.16) descreve uma reta de coeficiente angular m :

$$m = \frac{1}{C} \quad (3.17)$$

e que intercepta o eixo das ordenadas em b :

$$b = -\frac{1}{C} 2D \quad (3.18)$$

A partir de (3.17) e (3.18), a posição do centro acústico em relação ao diafragma pode ser expressa como:

$$D = -\frac{b}{2m} \quad (3.19)$$

A Tabela 3.5 contém alguns valores para a posição do centro acústico para microfones LS2, seguidos de suas incertezas expandidas, apresentados por WAGNER e NEDZELNITSKY [21].

Tabela 3.5 – Valores para a posição do centro acústico para microfones LS2
(referenciados ao diafragma) [21].

Frequência (kHz)	Posição (mm)	Incerteza (mm)
2	3,3	1,5
4	3,5	1,2
8	2,6	1,0
10	1,4	0,9
12,5	1,5	Não declarada
16	0,3	0,9
20	0,2	1,0
25	- 0,6	1,1
40	- 1,6	1,6
50	- 1,8	2,0

BARRERA-FIGUEROA *et al* [22], propõem procedimento análogo ao apresentado por WAGNER e NEDZELNITSKY, porém sem as correções para compensar os efeitos das variações da pressão estática e da temperatura; destacam também que a simplicidade deste procedimento está relacionada às seguintes condições: (i) a distância do receptor à fonte é grande quando comparada com a soma das posições dos centros acústicos; (ii) as propriedades físicas do ar dentro da câmara anecóica podem ser determinadas com exatidão a partir de procedimentos padronizados, por exemplo, normas internacionais; (iii) na faixa de distância onde as medições são realizadas a posição do centro acústico varia muito pouco.

Ainda segundo BARRERA-FIGUEROA *et al* [22], como nas calibrações por reciprocidade em campo livre são utilizados três microfones, três centro acústicos são determinados para cada microfone. Assim, o centro acústico de cada microfone pode ser determinado resolvendo um sistema de equações. Para o microfone 1, a posição do centro acústico em relação ao diafragma, D_1 , é determinado por:

$$D_1 = \frac{b_{12}/m_{12} + b_{13}/m_{13} - b_{23}/m_{23}}{2} \quad (3.20)$$

onde b_{ij} é a interseção da reta com o eixo das ordenadas para os microfones i e j e m_{ij} é o coeficiente angular da reta para os microfones i e j .

Equações similares podem ser obtidas para os outros microfones. A Tabela 3.6 contém alguns valores para posição do centro acústico para microfones LS2, seguidos das incertezas correspondentes, apresentados por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22].

Tabela 3.6 – Valores para a posição do centro acústico para microfones LS2 (referenciados ao diafragma) [22].

Frequência (kHz)	Posição (mm)	Incerteza (mm)
1,0	4,26	5,71
2,0	4,44	1,83
4,0	4,04	0,62
5,0	3,25	0,60
8,0	2,26	0,66
10,0	1,80	0,70
16,0	0,84	0,66
20,0	0,51	0,60
25,0	- 0,01	0,59
40,0	- 1,37	0,75
50,0	- 17,57	10,20

A Figura 3.1 compara os valores para a posição do centro acústico determinados pela IEC 61094-3 [4], por WAGNER e NEDZELNITSKY [21] e por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22] para a faixa de frequência de 1 kHz a 50 kHz. Já a Figura 3.2 compara os valores para a posição do centro acústico determinados pela IEC 61094-3 [4], por WAGNER e NEDZELNITSKY [21] e por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22] apenas para as frequências apresentadas na IEC 61094-3 ou seja, para as frequências centrais das bandas de terço de oitava de 1 kHz a 20 kHz.

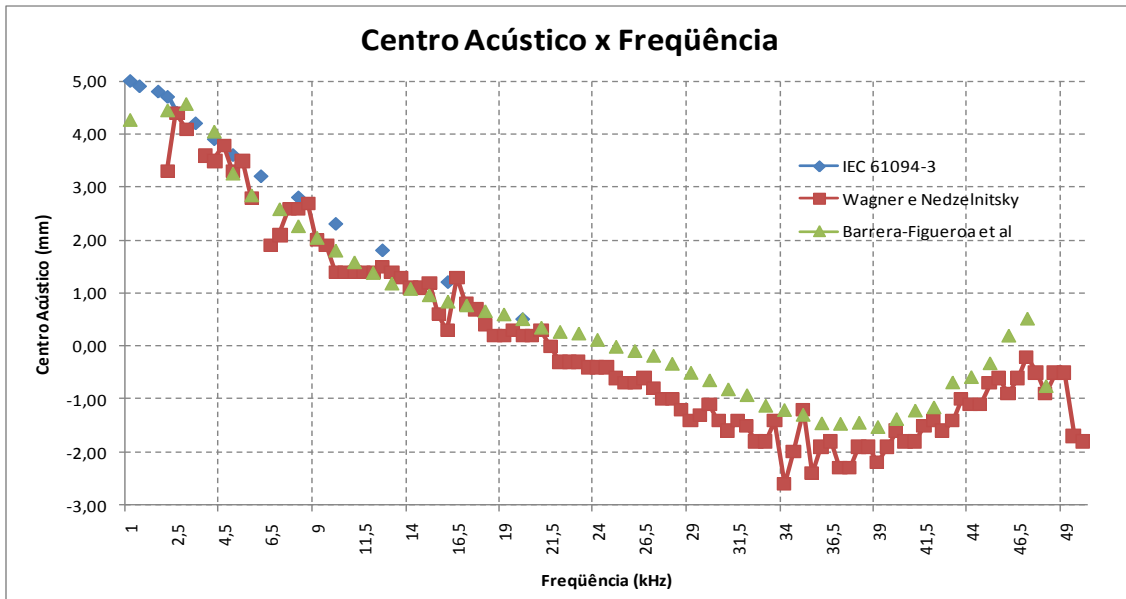


Figura 3.1 – Valores para a posição do centro acústico determinados pela IEC 61094-3 [4], por WAGNER e NEDZELNITSKY [21] e por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22] para a faixa de freqüência de 1 kHz a 50 kHz.

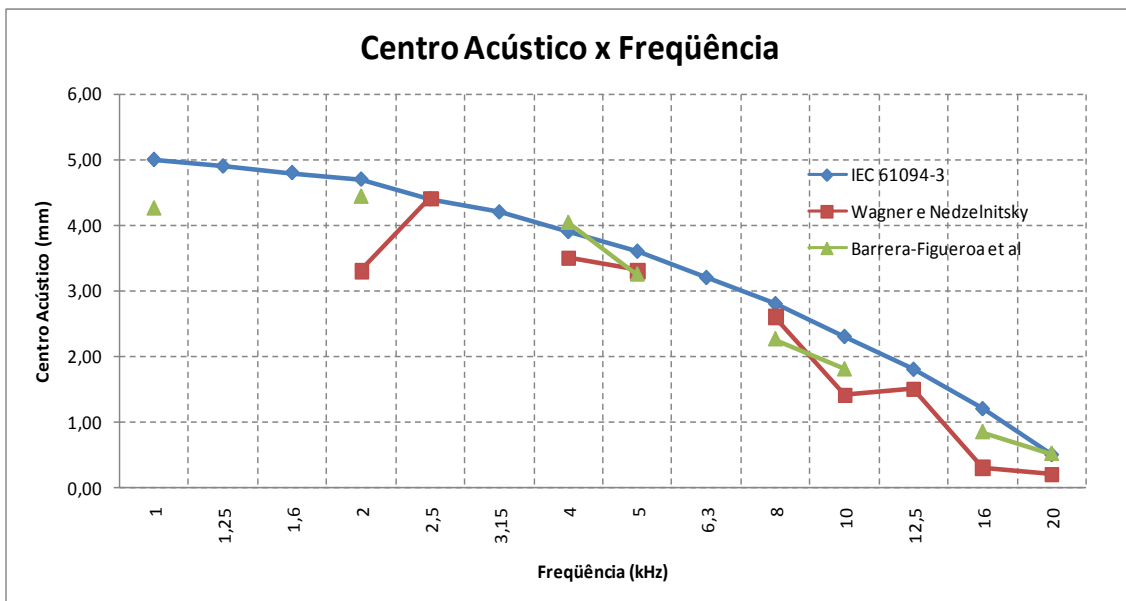


Figura 3.2 – Valores para a posição do centro acústico determinados pela IEC 61094-3 [4], por WAGNER e NEDZELNITSKY [21] e por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22] para as freqüências centrais das bandas de terço de oitava de 1 kHz a 20 kHz.

Um método alternativo para determinar o centro acústico é proposto por HRUSKA e KOIDAN [23]. Nele, determina-se, simultaneamente, o centro acústico e o coeficiente de absorção do som pelo ar.

Para dois microfones em campo livre, um utilizado como fonte sonora e o outro como receptor sonoro, toma-se que o ponto de referência para determinação do centro acústico está localizado no diafragma do microfone e assume-se que esse ponto e o centro acústico estão sob uma mesma linha reta. Supondo que a tensão de saída do microfone receptor é proporcional a pressão sonora no seu centro acústico, a tensão de saída pode ser dada por:

$$U_2 = \frac{B e^{-\alpha(x_{ij}-2D)}}{(x_{ij} - 2D)} \quad (3.21)$$

Tomando o logaritmo natural dos dois lados de (3.21) obtemos:

$$\ln U_2 = \ln B - \alpha(x_{ij} - 2D) - \ln x_{ij} - \ln \left(1 - \frac{2D}{x_{ij}} \right) \quad (3.22)$$

Assumindo que a distância entre os microfones é maior que a soma das posições dos centros acústicos dos microfones, o último termo pode ser expandido em série de Taylor:

$$\ln \left(1 - \frac{2D}{x_{ij}} \right) = \left(-\frac{2D}{x_{ij}} \right) - \frac{1}{2} \left(-\frac{2D}{x_{ij}} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(-\frac{2D}{x_{ij}} \right)^3 - \dots \quad (3.23)$$

Como normalmente a distância entre os microfones é muito maior que a soma das posições dos centros acústicos dos microfones, os termos não lineares da série de Taylor podem ser negligenciados e, desta forma, a Equação (3.22) pode ser simplificada para:

$$x_{ij}(\ln U_2 + \ln x_{ij}) = -\alpha x_{ij}^2 + (\ln B + \alpha 2D)x_{ij} + 2D \quad (3.24)$$

O lado direito da Equação (3.24) é um polinômio de segundo grau em x_{ij} . O lado esquerdo é função de U_2 e x_{ij} , os quais podem ser medidos diretamente. Assim, a partir das medições de U_2 e x_{ij} , os coeficientes de interesse α e $2D$ podem ser determinados com um ajuste pelo método dos mínimos quadrados dos dados experimentais. Segundo

BARRERA-FIGUEROA [15], este método pode ser útil quando se suspeita que a composição do ar esteja alterada, caso em que o cálculo do coeficiente de absorção do som pelo ar segundo a ISO 9613-1 [19] é inapropriado.

Outro método alternativo para determinar o centro acústico é proposto por VORLÄNDER e BIETZ [24]. Se no método baseado na lei do inverso da distância é necessário que sejam realizadas medições em diferentes distâncias para determinar o centro acústico com maior exatidão, VORLÄNDER e BIETZ [24] sugerem que o centro acústico pode ser determinado a partir de medições de fase realizadas em uma única distância. A partir das medições de fase, o atraso de grupo τ pode ser calculado de acordo com:

$$\tau = -\frac{d\varphi}{d\omega} \quad (3.25)$$

onde φ é a fase da resposta em frequência.

Um atraso de grupo igual a zero indica que as medições estão sendo realizadas no centro acústico do microfone. Um atraso de grupo diferente de zero indica que o centro acústico está deslocado em relação ao diafragma do microfone; neste caso, com o atraso de grupo e utilizando a velocidade de propagação do som no ar, c , a posição do centro acústico em relação ao diafragma pode ser determinada por:

$$D = -c\tau \quad (3.26)$$

3.4 Determinação da Impedância de Transferência Elétrica

Embora a determinação da impedância de transferência elétrica pareça ser um processo simples (ver Equação (3.8)), ela é, na verdade, um processo muito difícil e complicado [25]. O objetivo deste item é apresentar alguns aspectos que devem ser observados quando da determinação da impedância de transferência elétrica.

3.4.1 Cálculo dos Níveis Típicos de Sinais

Segundo a IEC 61094-3 [4], a impedância de transferência elétrica (complexa) no campo livre entre os microfones 1 e 2 é dada por:

$$Z_{e,12} = \frac{U_{r,2}}{i_{t,1}} = j \frac{\rho f}{2d_{12}} M_{f,1} M_{f,2} e^{-\gamma d_{12}} \quad (3.27)$$

onde $M_{f,i}$ é a sensibilidade em campo livre do microfone i .

Trabalhando com o módulo da impedância de transferência elétrica no campo livre entre os microfones 1 e 2 e negligenciando o coeficiente de absorção do som pelo ar, a Equação (3.27) pode ser simplificada para:

$$Z_{e,12} = \frac{U_{r,2}}{i_{t,1}} = \frac{\rho f}{2d_{12}} M_{f,1} M_{f,2} \quad (3.28)$$

Segundo RASMUSSEN [25], $i_{t,1}$ pode ser medida a partir de:

$$i_{t,1} = U_{ger} \varpi C_{mic} \quad (3.29)$$

onde U_{ger} é a tensão aplicada pelo gerador de sinais e C_{mic} é capacitância do microfone fonte.

Substituindo (3.29) em (3.28), obtemos:

$$U_{r,2} = U_{ger} \frac{\pi \rho f^2}{d_{12}} C_{mic} M_{f,1} M_{f,2} \quad (3.30)$$

Para microfones LS2, a sensibilidade nominal de circuito aberto típica em 250 Hz é de 12,5 mV/Pa e a capacitância típica é de 17,5 pF [26].

Assumindo que num sistema de medição por reciprocidade normalmente a tensão máxima aplicada pelo gerador de sinais é 8 V, assumindo uma distância entre os

centros acústicos de 0,25 m, assumindo a densidade do ar de $1,2 \text{ kg/m}^3$ e utilizando os valores típicos de sensibilidade e capacitância, obtemos:

$$U_{r,2} = 0,33 f_{\text{kHz}}^2 \mu V \quad (3.31)$$

Esta equação mostra que para baixas frequências, o valor da tensão $U_{r,2}$ é muito baixo quando comparado com o ruído elétrico do pré-amplificador, aproximadamente $11 \mu V$ [27], o que impossibilita as medições para essas frequências. Isso não chega a ser um problema, uma vez que a sensibilidade em campo livre é igual às sensibilidades em campo de pressão e em campo difuso para frequências abaixo de 800 Hz (para microfones de meia polegada) e o microfone pode ser calibrado por reciprocidade em campo de pressão. Tradicionalmente, a mais baixa frequência medida para microfones LS2 é 1 kHz.

Para a frequência de 1 kHz obtemos:

$$U_{r,2} = 0,33 \mu V \quad (3.32)$$

Comparando este sinal com o ruído elétrico de um pré-amplificador obtém-se uma relação sinal-ruído de -30 dB , o que significa que este sinal está 30 dB abaixo do ruído elétrico. Isto cria uma série de problemas para medi-lo. Estes são:

a) Diafonia (*Crosstalk*) [28]

A diafonia ocorre quando o sinal transmitido pelo canal que alimenta o microfone fonte cria uma interferência no canal que recebe o sinal do microfone receptor. Ela é uma característica do sistema de medição. Segundo RASMUSSEN [25], se o nível do sinal de saída do microfone receptor, $U_{r,2}$, (ver Equação(3.32)), tem de ser determinado com uma exatidão de $0,01 \text{ dB}$, a diafonia deve estar 60 dB abaixo do nível do sinal de saída do microfone receptor.

b) Malha de Terra (*Ground Loops*) [28]

Deve-se tomar especial cuidado ao montar o sistema de medição para se evitar malhas de terra que resultam na diafonia e em outras perturbações. Para minimizar o seu efeito deve-se utilizar pequenos comprimentos para os cabos [25].

c) Distância entre os Microfones e Inter-espalhamento (*Multiple Backscattering*)

A utilização de pequenas distâncias entre os microfones irá aumentar a relação sinal-ruído e facilitar a medição da impedância de transferência elétrica, mas, deverão ser utilizadas distâncias grandes o suficiente para garantir condições de ondas planas e evitar o fenômeno do inter-espalhamento.

O inter-espalhamento, conhecido inicialmente como ondas estacionárias, é uma interferência entre o som direto e o seu espalhamento nas bordas dos microfones [29].

Segundo BARRERA-FIGUEROA [15], a amplitude do inter-espalhamento aumenta com o aumento da frequência o que concorda com o fato de que ele aparece quando o comprimento de onda torna-se comparável com as dimensões do microfone.

O *Danish Primary Laboratory for Acoustics* (DPLA), instituto nacional de metrologia da Dinamarca, recomenda distâncias entre 150 mm e 300 mm para microfones LS2 sendo que o inter-espalhamento é ainda observado para as distâncias maiores [25].

d) Amplitude do Sinal de Excitação

A amplitude do sinal de excitação, U_{ger} , utilizado pelo DPLA, é inversamente proporcional à frequência. Para microfones LS2, é de 10 V para frequências a partir de, aproximadamente, 2 kHz e vai reduzindo até 1 V para frequências acima de 20 kHz [25]. Segundo RASMUSSEN [25], a amplitude do sinal de excitação pode aumentar a tensão de polarização no microfone fonte e conseqüentemente, aumentar sua sensibilidade. Se o nível do sinal de saída deve ser determinado com uma exatidão de 0,01 dB a amplitude máxima do sinal de excitação é dada por:

$$U_{ger,m\acute{a}x} \approx 0,045 U_p \quad (3.33)$$

onde U_p é a tensão de polarização do microfone.

Para microfones LS2, a tensão de polarização é de 200 V [26]. Desta forma a amplitude máxima do sinal de excitação é de, aproximadamente, 9 V.

Ainda segundo RASMUSSEN [25], valores para a amplitude do sinal de excitação entre 8 V e 10 V irão gerar graves distorções nas altas frequências.

e) Reflexões nas Paredes da Câmara Anecóica e nos Suportes Mecânicos

O nível do sinal das reflexões deve estar 60 dB abaixo do nível do sinal de saída do microfone receptor para que o nível do sinal de saída do microfone receptor seja influenciado em menos que 0,01 dB [25].

Deve-se tomar especial cuidado com os suportes mecânicos que sustentam os microfones. A IEC 61094-3 [4] especifica que os microfones devem ser fixados em hastes de diâmetro igual ao diâmetro nominal do microfone e de comprimento grande se comparado a esse diâmetro. O seu comprimento deve ser no mínimo, dez vezes o diâmetro nominal do microfone, com a terminação gradualmente afilada. Nenhuma espécie de braçadeira deve estar mais próxima que 50 cm de qualquer um dos microfones [25].

3.4.2 Medição da Corrente de Entrada no Terminal Elétrico do Microfone

Segundo SOARES [12], a medição da corrente de entrada no terminal elétrico do microfone fonte é substituída pela medição da tensão sobre um capacitor colocado em série com o microfone. Isto porque a medição de corrente é mais complexa que a medição de tensão e também porque a medição da mesma grandeza elétrica nos microfones fonte e receptor permite baixar a estimativa da incerteza de medição, como será visto no Capítulo 5. Assim o módulo da corrente de entrada no terminal elétrico do microfone fonte é determinado por:

$$i_{t,i} = \frac{U_{t,i}}{\frac{1}{2\pi f C_x}} = 2\pi f C_x U_{t,i} \quad (3.34)$$

onde $U_{t,i}$ é a tensão sobre o capacitor, de capacitância C_x , colocado em série com o microfone fonte.

Desta forma, calibrando-se o capacitor é possível determinar o valor verdadeiro da sua capacitância [12] e desta maneira é possível determinar o módulo da impedância de transferência elétrica entre os microfones 1 e 2 de acordo com:

$$Z_{e,12} = \frac{U_{r,2}}{2\pi f C_x U_{t,1}} \quad (3.35)$$

De maneira análoga se obtém a equação para a impedância de transferência elétrica entre os demais pares de microfones,

$$Z_{e,ij} = \frac{U_{r,j}}{2\pi f C_x U_{t,i}} \quad (3.36)$$

A Figura 3.3 apresenta o esquema da medição da impedância de transferência elétrica.

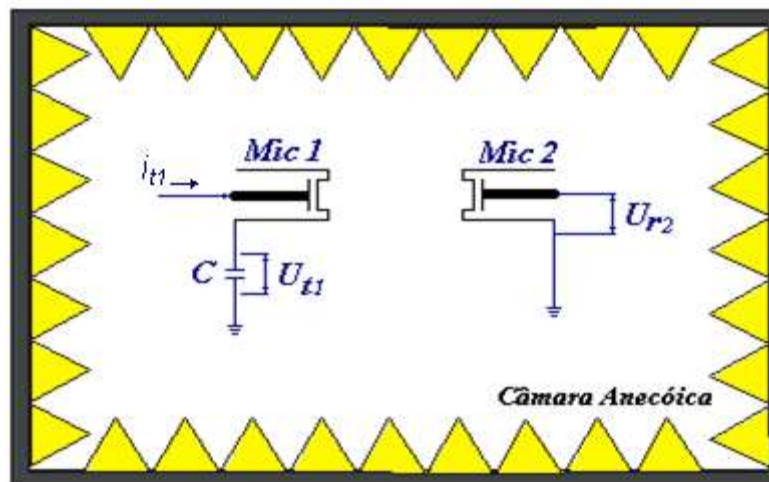


Figura 3.3 – Esquema da medição da impedância de transferência elétrica em campo livre.

Substituindo a Equação (3.36) nas Equações (3.9), (3.10) e (3.11) as sensibilidades dos microfones 1, 2 e 3 podem ser calculadas a partir de:

$$M_{f,1} = \left[\frac{1}{\pi \rho f^2 C_x} \frac{U_{r,2}}{U_{t,1}} \frac{U_{r,3}}{U_{t,1}} \frac{U_{t,2}}{U_{r,3}} \frac{d_{12} d_{13}}{d_{23}} e^{\alpha(d_{12} + d_{13} - d_{23})} \right]^{1/2} \quad (3.37)$$

$$M_{f,2} = \left[\frac{1}{\pi \rho f^2 C_x} \frac{U_{r,3}}{U_{t,2}} \frac{U_{r,2}}{U_{t,1}} \frac{U_{t,1}}{U_{r,3}} \frac{d_{23} d_{12}}{d_{13}} e^{\alpha(d_{23} + d_{12} - d_{13})} \right]^{1/2} \quad (3.38)$$

$$M_{f,3} = \left[\frac{1}{\pi \rho f^2 C_x} \frac{U_{r,3}}{U_{t,2}} \frac{U_{r,3}}{U_{t,1}} \frac{U_{t,1}}{U_{r,2}} \frac{d_{23} d_{13}}{d_{12}} e^{\alpha(d_{23} + d_{13} - d_{12})} \right]^{1/2} \quad (3.39)$$

CAPÍTULO 4

DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA ELÉTRICA

4.1 Técnica Clássica

Na técnica clássica para a determinação da impedância de transferência elétrica, a excitação do microfone fonte é feita com tons puros. É medida a tensão sobre o capacitor colocado em série com o microfone fonte (U_t) e também a tensão sobre o microfone receptor (U_r). Em ambos os casos é medida a resposta ao sinal de excitação. A Figura 4.1 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

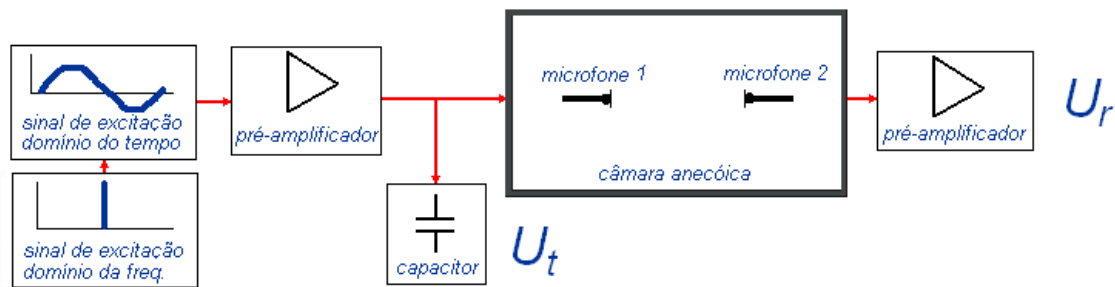


Figura 4.1 – Diagrama de blocos da técnica clássica.

Com essa técnica é possível perceber os efeitos nocivos da diafonia, do inter-espalhamento e das demais reflexões sobre a resposta em frequência, mas não é possível identificá-los, muito menos eliminá-los. A Figura 4.2 mostra a sensibilidade de um microfone obtida utilizando essa técnica. Observa-se nas frequências abaixo de 4 kHz a presença de ondulações devido à presença da diafonia, do inter-espalhamento e das demais reflexões. O sistema de medição utilizado está descrito no item 4.3.4.

Calibrando os mesmos microfones utilizando diferentes distâncias entre o microfone fonte e o microfone receptor, observa-se que as ondulações continuam presentes embora não tenham o mesmo comportamento, como pode ser visto na Figura 4.3. Pode ser visto também uma variação da ordem de 1 dB para a sensibilidade em 40 kHz.

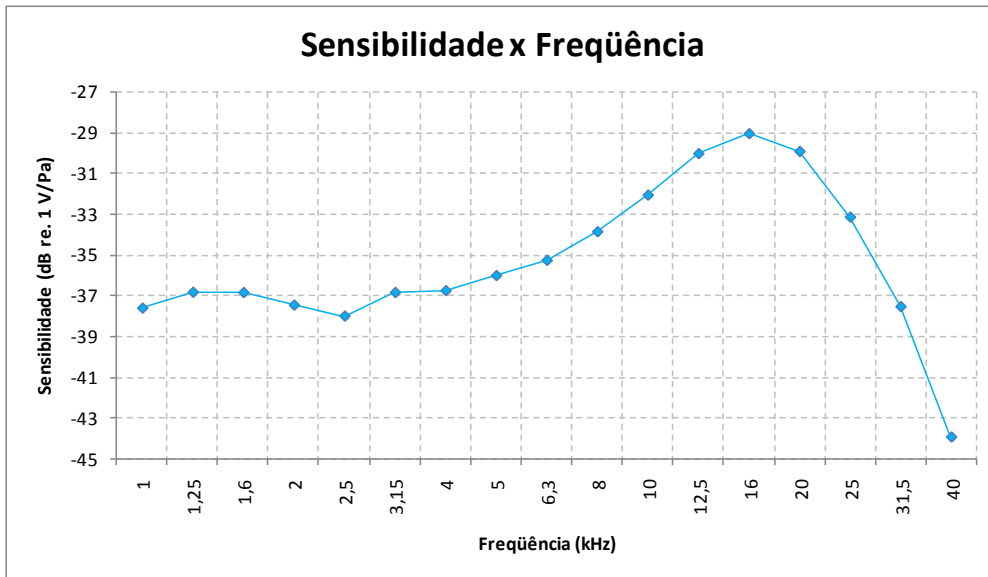


Figura 4.2 – Sensibilidade de um microfone obtida utilizando a técnica clássica. A distância entre os microfones foi de 17 cm.

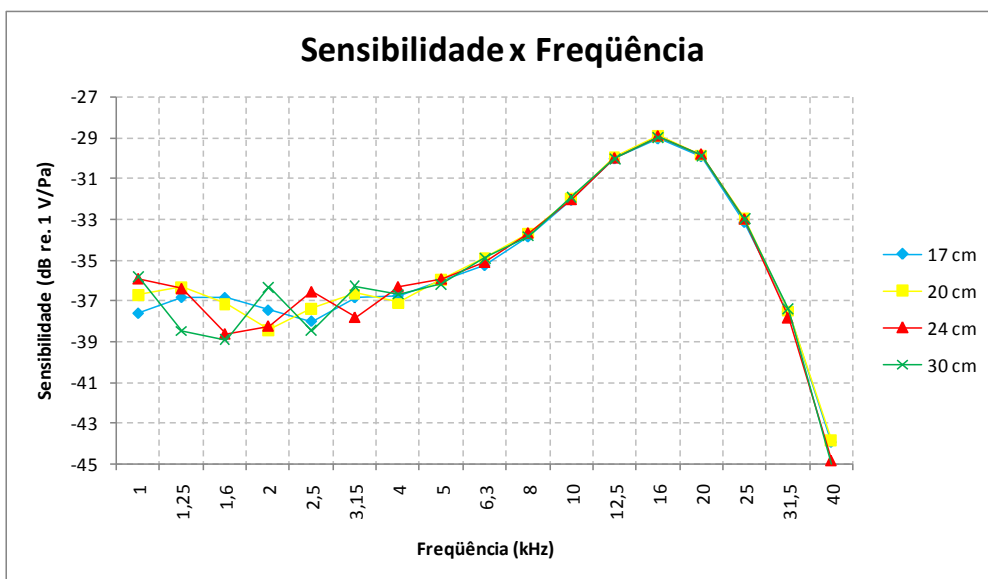


Figura 4.3 – Sensibilidades de um mesmo microfone obtidas utilizando a técnica clássica. As distâncias entre os microfones foram de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm.

A solução adotada é calibrar os microfones utilizando diferentes distâncias entre os microfones e apresentar a média das sensibilidades obtidas. A Figura 4.4 mostra a média das sensibilidades obtidas para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm.

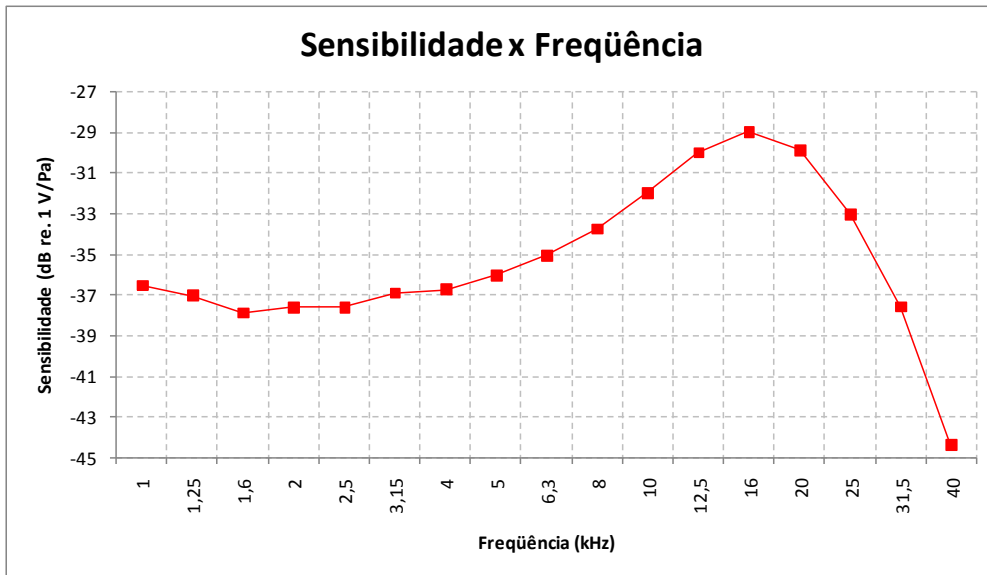


Figura 4.4 – Média das sensibilidades de um mesmo microfone obtidas para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm.

As amplitudes das ondulações nas frequências abaixo de 4 kHz diminuem, mas ainda são perceptíveis. A consequência é uma incerteza de medição alta para a faixa de 1 kHz a 4 kHz.

4.2 Técnica Proposta por Barrera-Figueroa

Na técnica proposta por BARRERA-FIGUEROA [15] para a determinação da impedância de transferência elétrica, a excitação do microfone fonte é feita com tons puros. É medida a tensão sobre o capacitor colocado em série com o microfone fonte (U_t) e também a tensão sobre o microfone receptor (U_r). Em ambos os casos é medida a resposta em frequência. BARRERA-FIGUEROA [15] propõe a utilização de uma técnica de seleção no tempo para supressão da diafonia, do inter-espalhamento e das demais reflexões. A Figura 4.5 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

De acordo com a técnica de seleção no tempo, aplica-se uma Transformada (Rápida) Inversa de Fourier (IFFT) à resposta em frequência para se obter a resposta impulsiva e depois, uma função janela para suprimir as componentes indesejadas. Finalmente, aplica-se uma Transformada Rápida de Fourier (FFT) à resposta impulsiva para se obter a resposta em frequência.

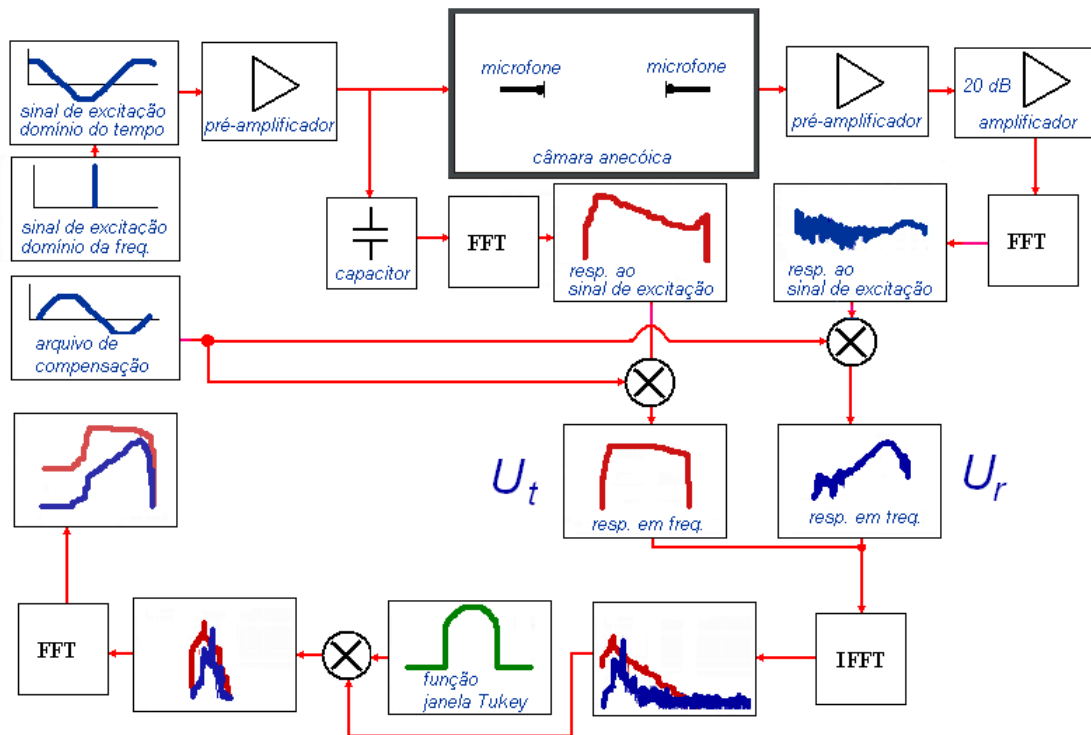


Figura 4.5 – Diagrama de blocos da técnica proposta por Barrera-Figueroa.

Segundo BARRERA-FIGUEROA [15] a função janela não deve modificar o som direto e deve suprimir a diafonia, o inter-espalhamento e as demais reflexões. Assim, a janela deveria ter valor unitário no trecho da resposta impulsiva que contém o som direto e valor zero nos demais trechos. A primeira escolha seria a janela retangular, entretanto, é esperado que ela introduza ondulações na resposta em frequência causadas pelo corte abrupto da resposta impulsiva num instante em que ela não decaiu completamente até o zero. Este efeito pode ser reduzido utilizando-se uma função janela com os extremos “suavizados” e que pode ser obtida convoluindo uma função janela retangular com uma função “suavizadora”. Deve-se observar que as amplitudes dos lóbulos laterais são determinadas pela parte da janela “suavizada” que corresponde à janela retangular; à medida que esta parte diminui, as amplitudes dos lóbulos laterais tendem a diminuir e a largura do lóbulo principal tende a aumentar. Estes efeitos devem ser considerados quando da escolha da função “suavizadora”. A Figura 4.6 mostra as janelas retangular, Hanning e Tukey no domínio do tempo e no domínio da frequência.

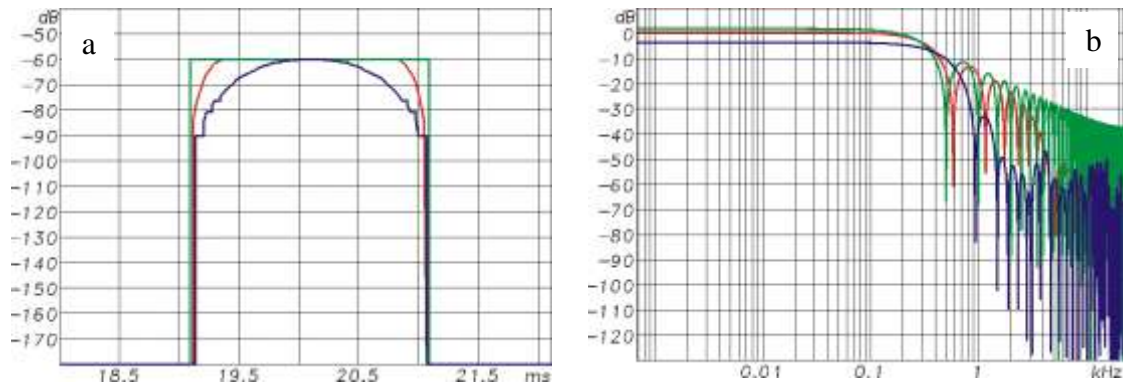


Figura 4.6 – a) Janelas retangular (—), Tukey (—) e Hanning (—) no domínio do tempo; b) formas correspondentes no domínio da frequência.

No domínio da frequência, essas janelas possuem lóbulos principais de diferentes larguras e lóbulos laterais de diferentes amplitudes. A largura do lóbulo principal está diretamente relacionada com o “detalhamento” da medição. Assim, quanto mais estreito for o lóbulo principal, mais detalhada será a medição do sinal na frequência de interesse. As amplitudes dos lóbulos laterais estão diretamente relacionadas com o “vazamento” da energia da banda da frequência de interesse para as bandas adjacentes. Assim, quanto menores forem as amplitudes dos lóbulos laterais menor será a energia “vazada” para as bandas de frequências adjacentes. Entretanto, o estreitamento do lóbulo principal causa o aumento das amplitudes dos lóbulos laterais, da mesma forma que a redução das amplitudes dos lóbulos laterais causa o alargamento do lóbulo principal. Desse modo, a escolha da janela mais adequada deve levar em consideração essas características e requer algum conhecimento *a priori* do sinal em análise. Como em muitos casos este conhecimento não está disponível, o que se pode fazer nesta situação é experimentar os diversos tipos de janela existentes e encontrar a que melhor se adapte à análise em questão.

Para a supressão da diafonia, do inter-espalhamento e das demais reflexões BARRERA-FIGUEROA [15] propõe a aplicação de uma janela Tukey, com 2 ms de largura e uma suavização nos extremos de 30% (Figura 4.6). A janela Tukey é obtida a partir da convolução de uma janela retangular com uma janela Hanning (função “suavizadora”). No entanto, a maior limitação desta solução é que a janela é muito estreita, cortando o som direto onde ele ainda não decaiu o suficiente, fazendo com que haja perda de energia. No domínio da frequência este corte do som direto é observado pelo surgimento de ondulações. A Figura 4.7 mostra as sensibilidades de um microfone

obtidas para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm e a sensibilidade média correspondente, utilizando essa técnica.

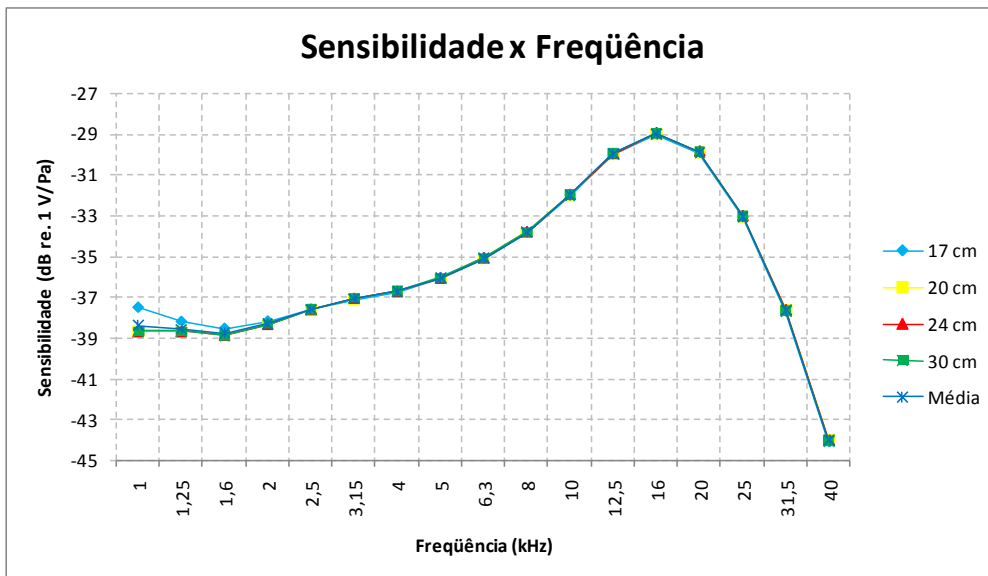


Figura 4.7 – Sensibilidades de um mesmo microfone obtidas utilizando a técnica proposta por Barrera-Figueroa. As distâncias entre os microfones foram de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm.

Observa-se que as sensibilidades apresentam uma concordância muito melhor que a apresentada na técnica clássica (ver Figura 4.3), mas ainda são perceptíveis algumas ondulações nas frequências abaixo de 4 kHz.

A Figura 4.8 compara as sensibilidades médias obtidas utilizando a técnica proposta por Barrera-Figueroa e a técnica clássica.

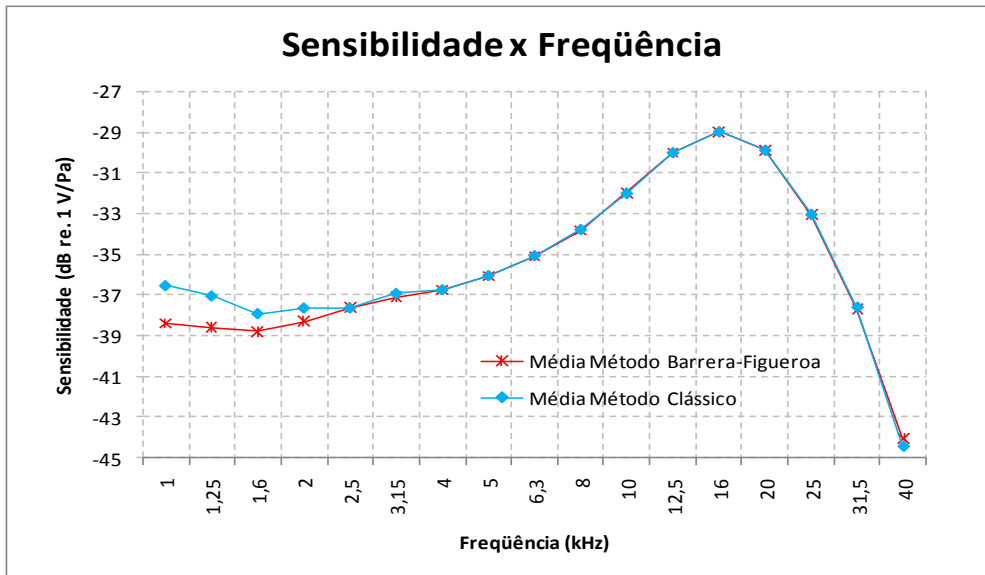


Figura 4.8 – Sensibilidades médias obtidas utilizando a técnica proposta por Barrera-Figueroa e a técnica clássica.

4.3 Técnica Proposta

Na técnica proposta neste trabalho para a determinação da impedância de transferência elétrica, a excitação do microfone fonte é feita com uma varredura de senos. É medida a tensão sobre o capacitor colocado em série com o microfone fonte (U_i) e também a tensão sobre o microfone receptor (U_r). Em ambos os casos é medida a resposta em freqüência, obtida pela multiplicação, no domínio da freqüência, da resposta a varredura de senos com um arquivo de compensação. Esse arquivo de compensação é o resultado da multiplicação do espectro do inverso do sinal de excitação pelo espectro de um filtro passa-banda com atraso máximo de fase – filtro fase máxima. As freqüências de corte da banda passante utilizada neste trabalho foram 850 Hz e 45 kHz. A Figura 4.9 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

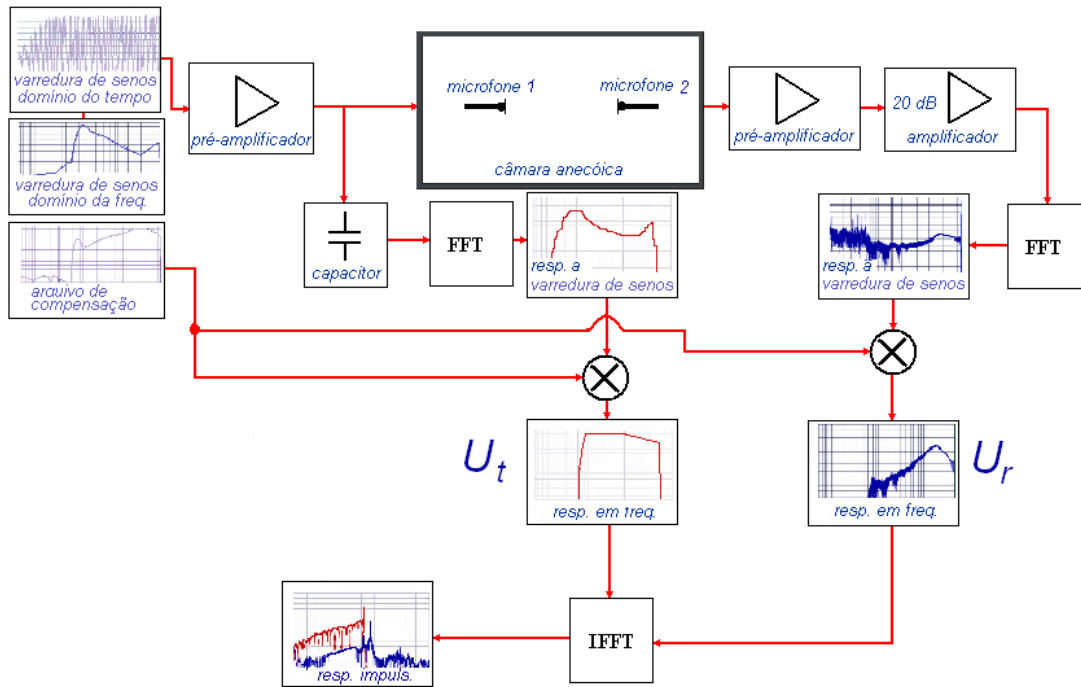


Figura 4.9 – Diagrama de blocos da técnica proposta.

A varredura de senos utilizada possui envelope constante na faixa de frequência de 1 kHz a 40 kHz com ênfase na faixa de 1 kHz a 6,3 kHz. Foi construída utilizando o programa Monkey Forest disponível comercialmente. O limite inferior de 1 kHz foi escolhido por causa da dificuldade de se medir abaixo desta frequência, devido ao baixo nível de tensão no microfone receptor (ver Capítulo 3). A ênfase na faixa de 1 kHz a 6,3 kHz foi feita para compensar a baixa sensibilidade do microfone nesta faixa de frequência. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram o sinal de excitação no domínio do tempo e no domínio da frequência. Nota-se (Figura 4.11) que a energia para a frequência de 1 kHz é aproximadamente 40 dB maior que a energia para a frequência de 20 kHz. Isto é obtido diminuindo-se a velocidade da execução do sinal de excitação na frequência de 1 kHz [30].

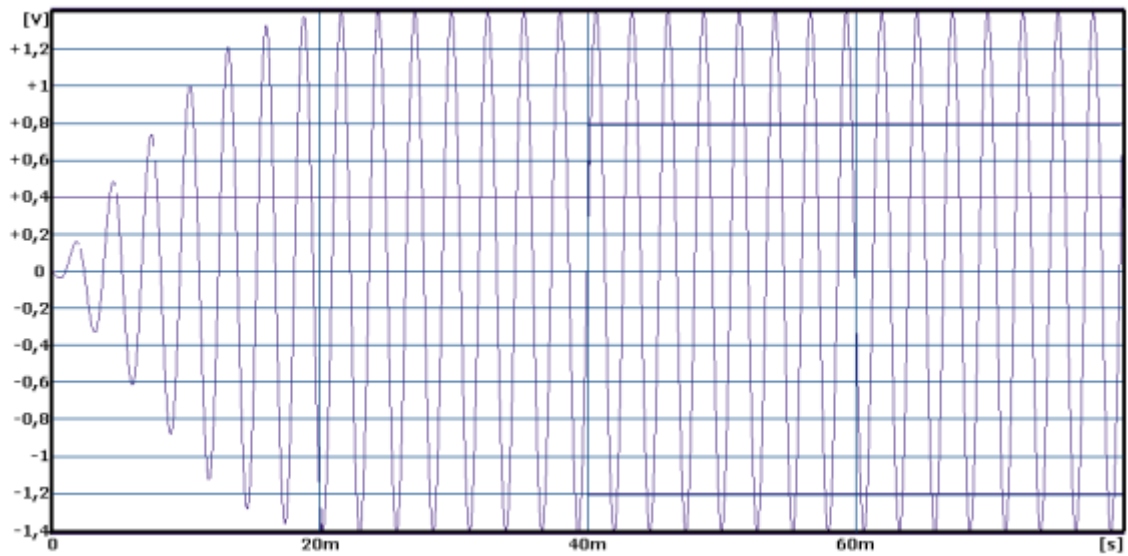


Figura 4.10 – Sinal de excitação no domínio do tempo.

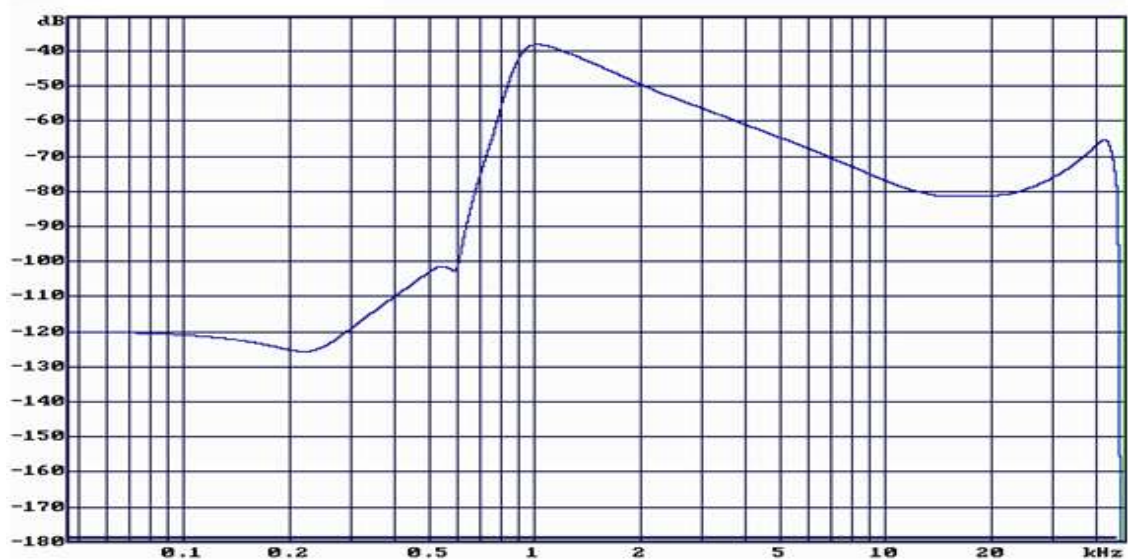


Figura 4.11 – Sinal de excitação no domínio da frequência.

Para a medição das tensões U_t e U_r o sinal de excitação tem sua amplitude amplificada para 7,7 volts eficaz.

Seguindo os passos descritos na Figura 4.10 foram medidas as tensões U_t e U_r no domínio da frequência (Figura 4.12) e no domínio do tempo (Figura 4.13).

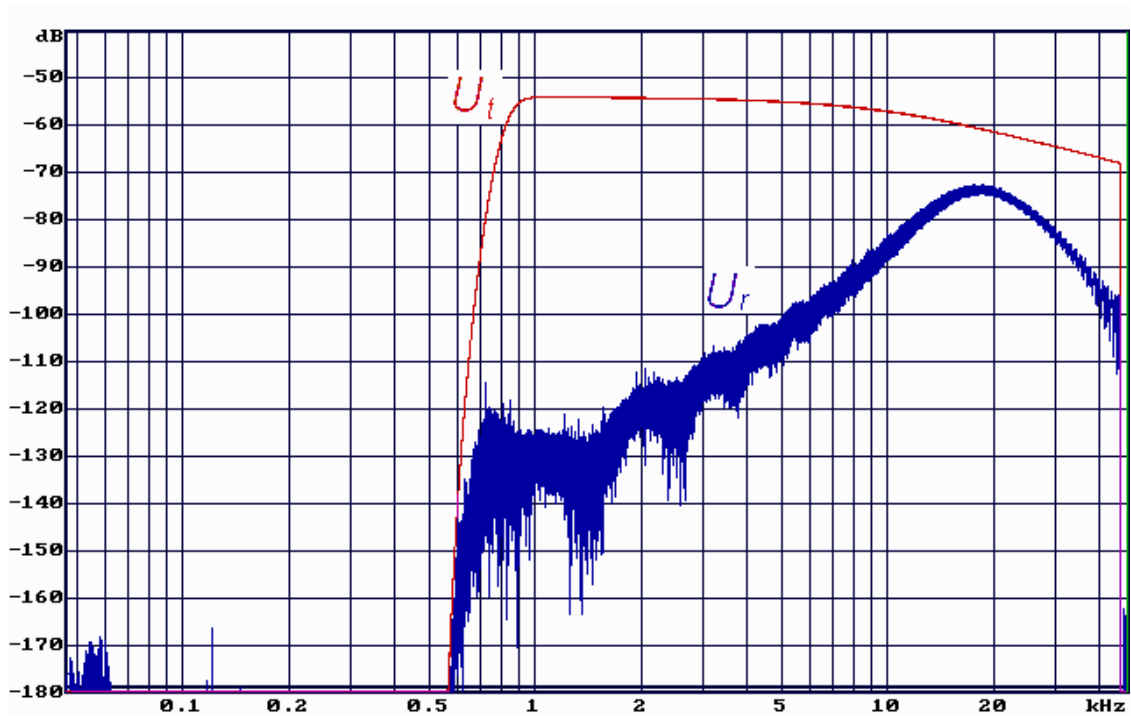


Figura 4.12 - Tensões U_t e U_r no domínio da frequência.

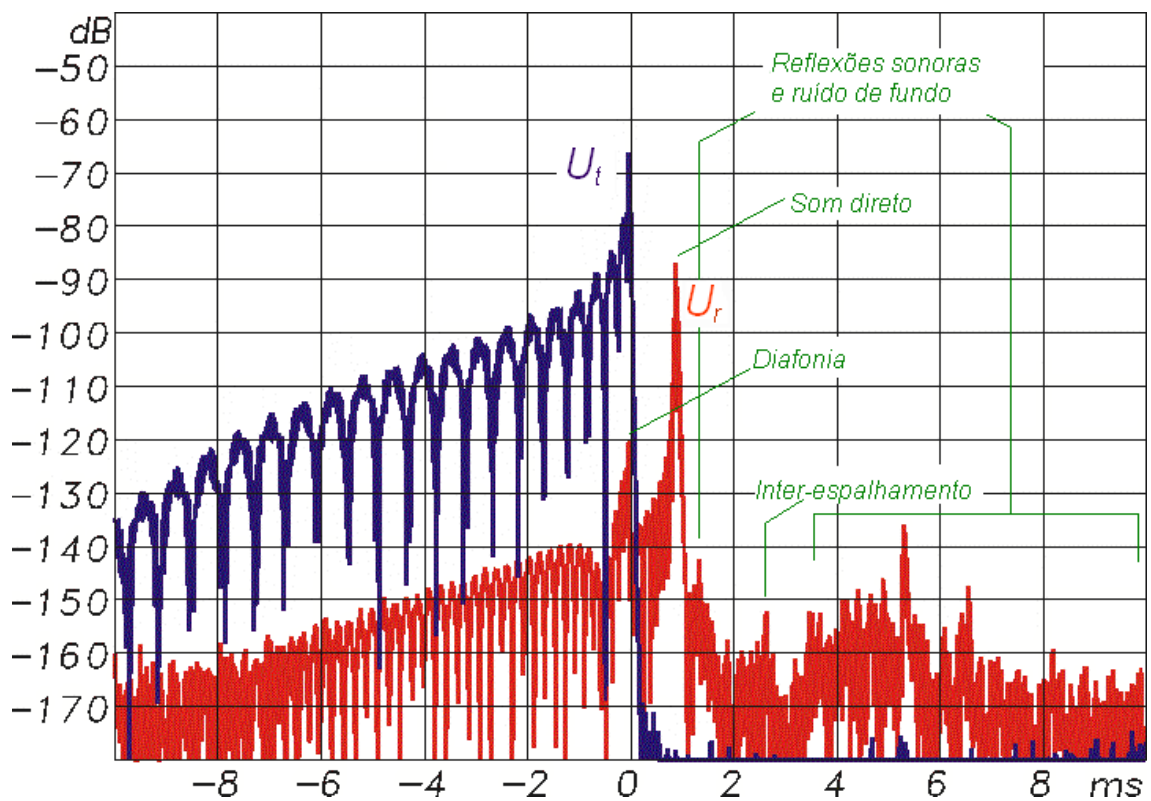


Figura 4.13 - Tensões U_t e U_r no domínio do tempo.

Observa-se que a diafonia aparece na medição da tensão U_r no mesmo instante que se inicia a medição da tensão U_t . O som direto aparece aproximadamente 0,9 ms

após o início da medição da tensão U_t , tempo necessário para que o som percorra a distância de 30 cm que separa os dois microfones. O inter-espalhamento aparece aproximadamente 2,7 ms após o início da medição da tensão U_t , tempo necessário para que o som percorra três vezes a distância que separa os dois microfones. Observa-se ainda, um pico de energia aproximadamente 0,5 ms do som direto, que se refere à reflexão na descontinuidade entre o pré-amplificador e a sua haste de sustentação. Finalmente, os picos de energia posteriores ao inter-espalhamento referem-se a reflexões (nas paredes da câmara anecóica), ao ruído de fundo, ao ruído elétrico e às componentes de distorção harmônica.

4.3.1 Subtração da Diafonia

Foram realizadas diversas medições da tensão U_r e observou-se que em todas elas a diafonia permaneceu constante, mostrando que ela é invariante no tempo para o sistema de medição utilizado. Desta forma, para removê-la foi utilizada a técnica da subtração. Substituindo o microfone receptor por um adaptador (B&K JJ2615 com capacitância de 20 pF, ver Figura 4.14) que simula um microfone mediu-se a diafonia de maneira idêntica à medição da tensão U_r . Como não havia nenhum microfone captando o sinal acústico transmitido pelo microfone fonte, o único sinal medido foi a diafonia, que tem natureza elétrica. Subtraiu-se então, no domínio da frequência, a diafonia da medição da tensão U_r . As Figuras 4.15 e 4.16 mostram a diafonia no domínio do tempo e no domínio da frequência. A Figura 4.17 mostra a diafonia sobreposta a tensão U_r . A Figura 4.18 ilustra o passo-a-passo deste procedimento.



Figura 4.14 – Adaptador, pré-amplificador e haste.

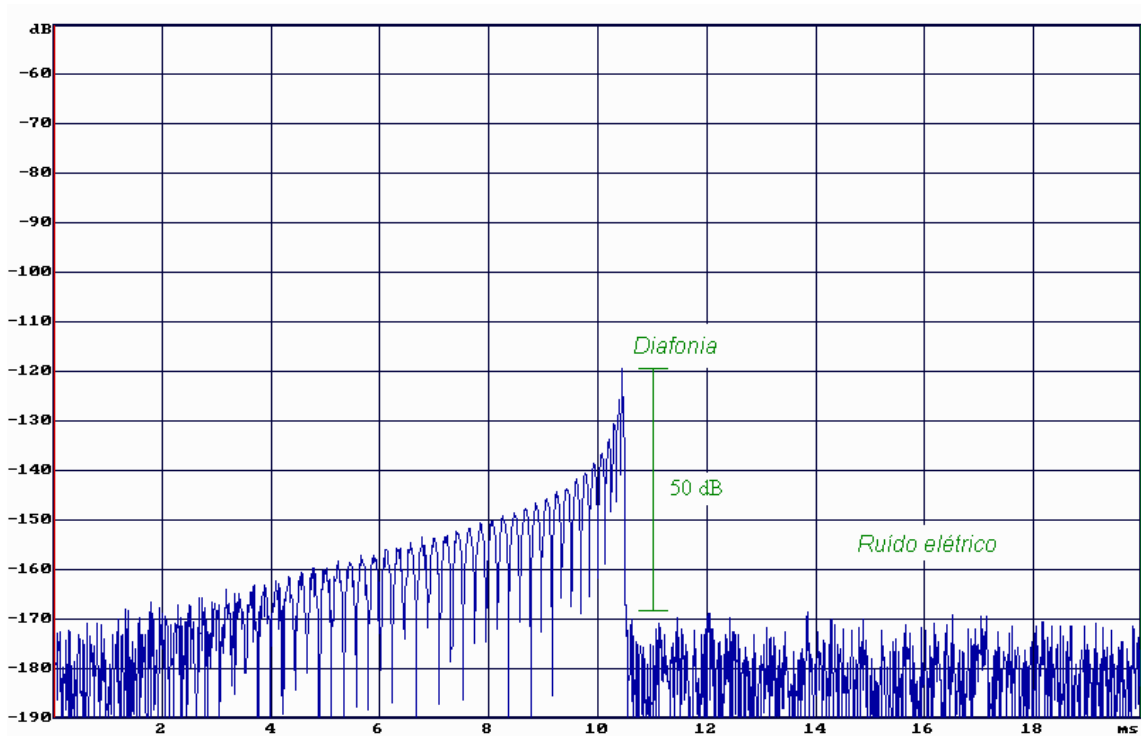


Figura 4.15 - Diafonia no domínio do tempo. O início da medição aparece no tempo de 10,5 ms.

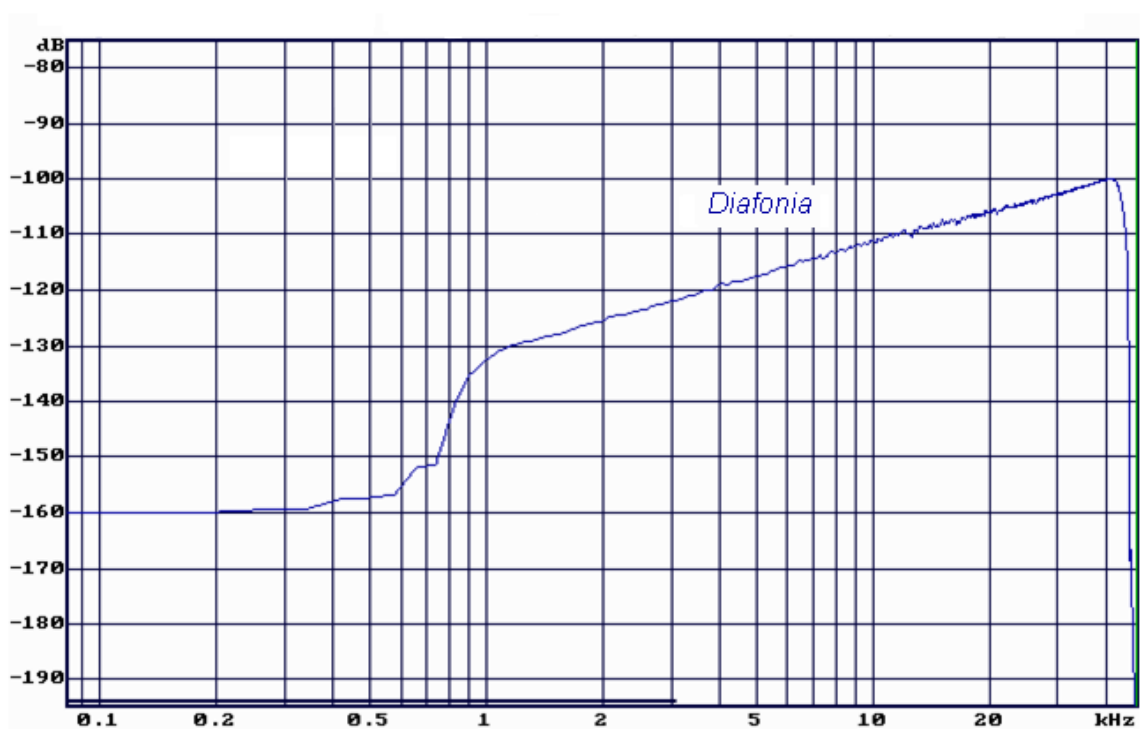


Figura 4.16 – Diafonia no domínio da frequência.

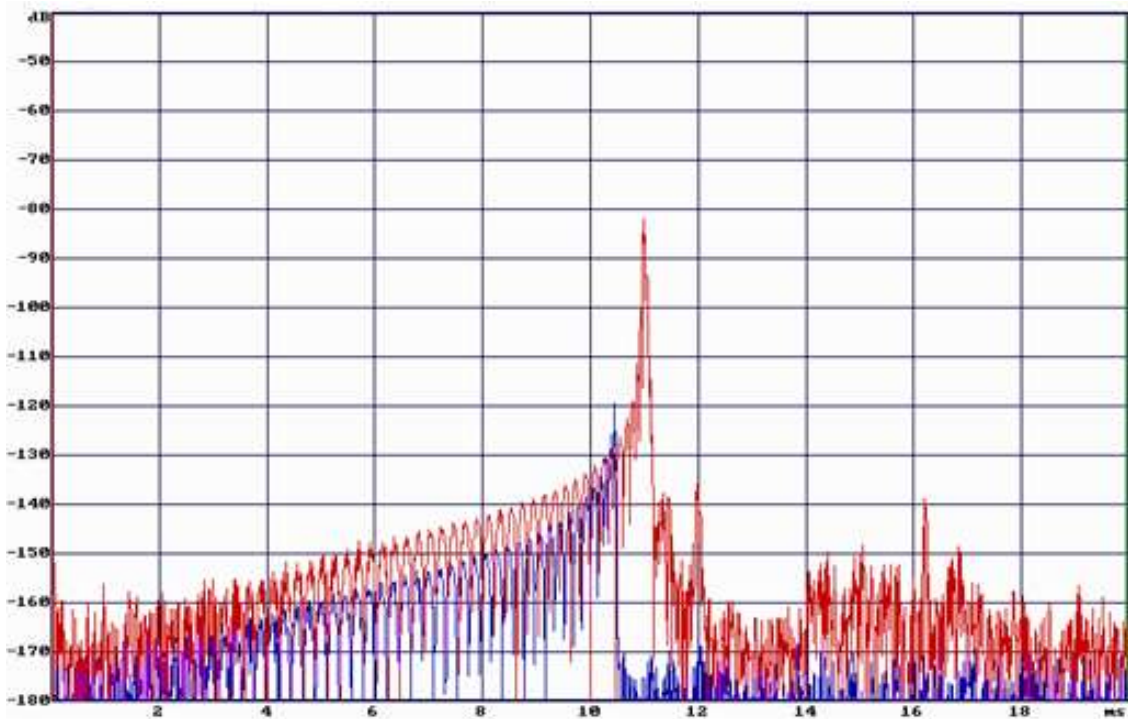


Figura 4.17 – Diafonia (—) sobreposta a tensão U_r (—). O início das medições aparece no tempo de 10,5 ms.

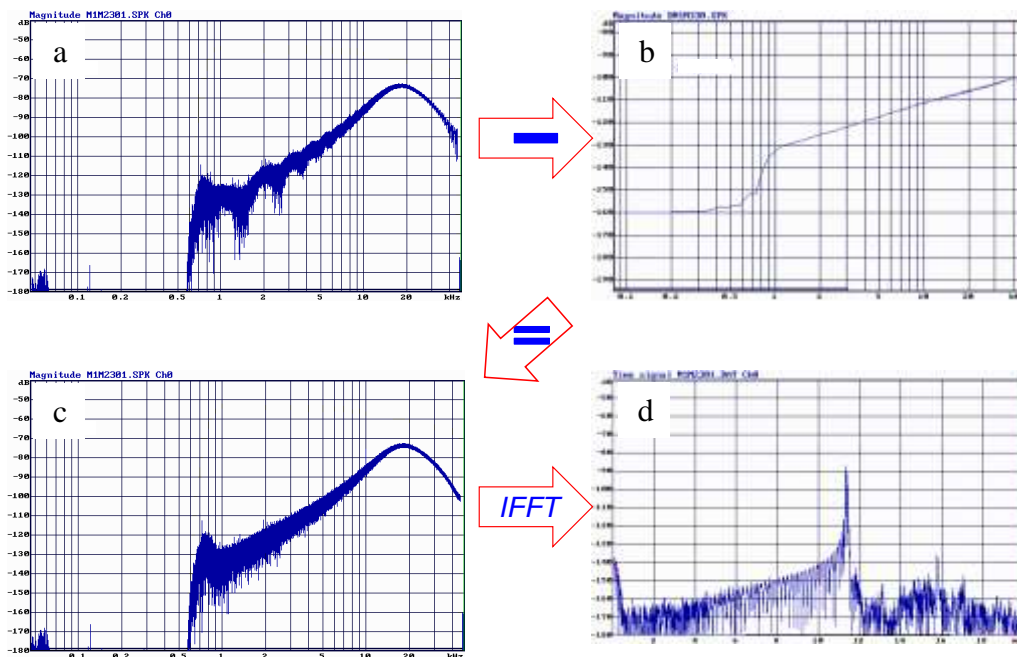


Figura 4.18 – Subtração da diafonia: a) tensão U_r no domínio da frequência; b) diafonia no domínio da frequência; c) tensão U_r no domínio da frequência após a subtração da diafonia; d) tensão U_r no domínio do tempo após a aplicação de uma IFFT.

A partir da Figura 4.18 é possível observar que, após a subtração da diafonia da medição da tensão U_r , as ondulações presentes na medição da tensão U_r são suprimidas (Figuras 4.18a e 4.18c), o que mostra que essas ondulações estão relacionadas com a diafonia.

Para a utilização desta técnica é importante garantir que a diafonia medida seja invariante no tempo, ou seja, que a sua amplitude e fase repetem-se durante medições subsequentes. Para o sistema de medições utilizado isto ocorre caso o mesmo não seja desligado entre as medições da tensão U_r e da diafonia. A Figura 4.19 ilustra o diagrama de blocos da técnica proposta incluindo a subtração da diafonia.

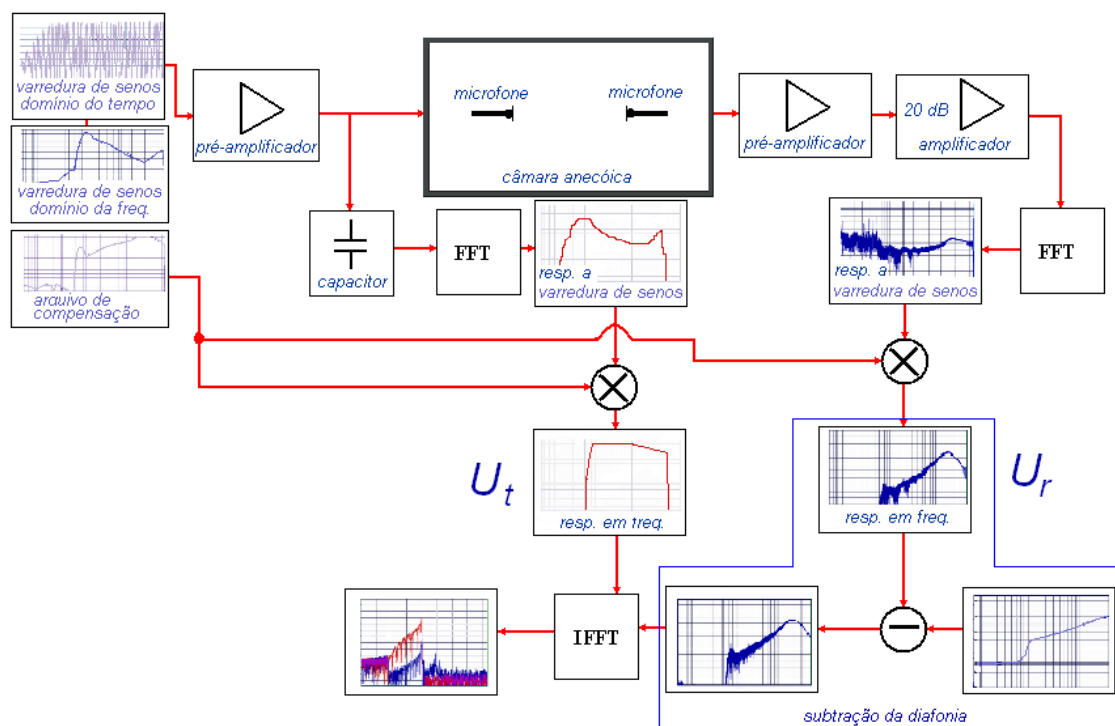


Figura 4.19 – Diagrama de blocos da técnica proposta incluindo a subtração da diafonia.

4.3.2 Supressão do Inter-espalhamento e das Reflexões nas Paredes da Câmara Anecóica e nos Suportes Mecânicos

A amplitude do inter-espalhamento diminui com o aumento da distância. Uma das soluções propostas para minimizar o seu efeito na medição da tensão U_r consiste em procurar a distância “ideal” para que este efeito torne-se negligenciável. Entretanto, aumentando-se a distância entre os microfones aumenta-se a influência das reflexões nas paredes, o que torna esta solução não eficiente [29].

Outra solução seria inclinar o eixo de simetria de um dos microfones em alguns poucos graus, mas esta solução também não é eficiente. Segundo BARRERA-FIGUEROA *et al* [29] é necessário um ângulo grande de inclinação e isto introduziria problemas adicionais como, por exemplo, na localização do centro acústico do microfone que depende do ângulo de incidência.

A solução que tem se mostrado mais adequada e que vem sendo utilizada é a aplicação de uma técnica de seleção no tempo [15,29]. Essa foi a solução utilizada neste trabalho, sendo a resposta impulsiva obtida com filtro fase máxima.

A resposta impulsiva com filtro fase máxima faz com que o decaimento associado a um dado pico de energia apareça todo à esquerda desse pico (ver Figura 4.20). Desta forma, o pico de energia do inter-espalhamento não fica sobreposto ao decaimento do som direto e torna-se possível distinguir o som direto (e seu decaimento) do inter-espalhamento (e seu decaimento). Apesar do pico de energia do som direto ficar sobreposto à parte final do decaimento do inter-espalhamento, como a energia do som direto está, aproximadamente, 70 dB acima, a energia do decaimento do inter-espalhamento não interfere na medição da energia do som direto.

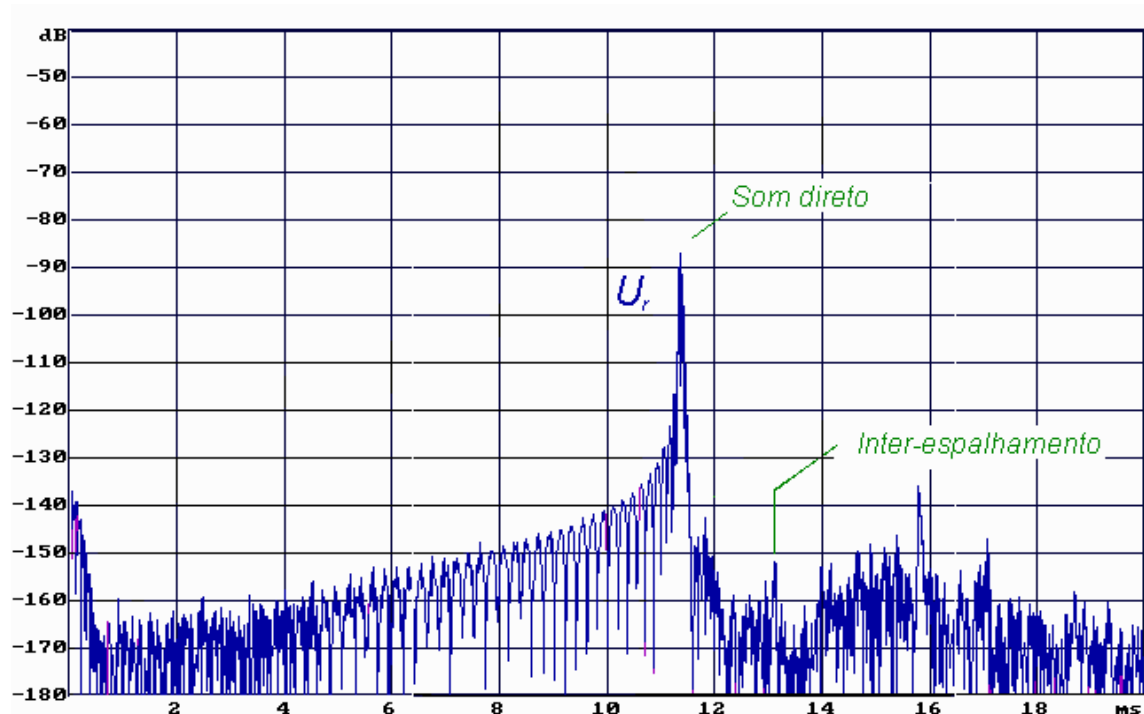


Figura 4.20 – Resposta impulsiva com filtro fase máxima da tensão U_r após a subtração da diafonia.

O procedimento adotado para a supressão do inter-espalhamento e das demais reflexões inclui o deslocamento do som direto para o tempo de 20 ms e a aplicação de uma janela híbrida. Esta janela tem a forma de uma janela retangular (com largura de 9 ms) com uma suavização assimétrica de uma janela Hanning (à direita, com largura de 656,3 μ s, e à esquerda, com largura 2 ms).

A aplicação desta janela suprime também o ruído de fundo, o ruído elétrico e as componentes de distorção harmônica que, com o deslocamento do som direto para o tempo de 20 ms, apareceram à esquerda dele. Normalmente, as componentes de distorção harmônica apareceriam à direita do som direto, no final da resposta impulsiva [30]. A Figura 4.21 ilustra o passo-a-passo desse procedimento.

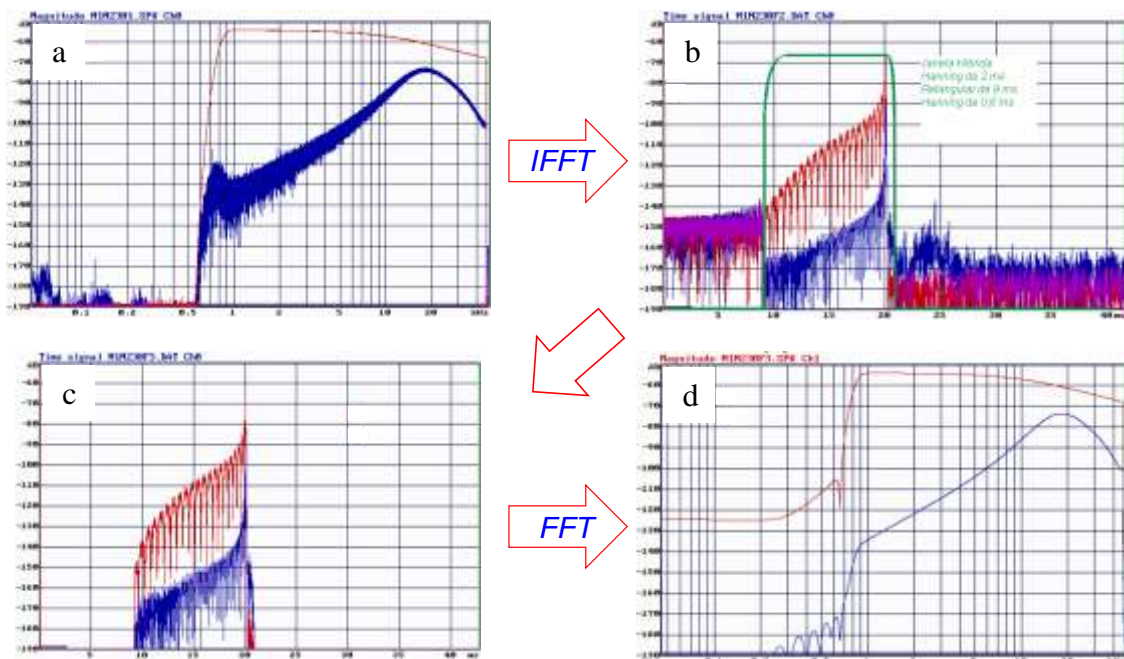


Figura 4.21 – Supressão do inter-espalhamento e das demais reflexões (tensão U_t (—) e tensão U_r (—)): a) tensões U_t e U_r no domínio da frequência (após a subtração da diafonia da tensão U_r); b) tensões U_t e U_r no domínio do tempo após a aplicação de uma IFFT e o deslocamento do pico de maior energia para o tempo de 20 ms; c) tensões U_t e U_r no domínio do tempo após a aplicação da janela híbrida; d) tensões U_t e U_r no domínio da frequência após a aplicação de uma FFT.

A Figura 4.21 mostra que, após a aplicação da janela, a medição da tensão U_r ficou mais “limpa” (Figuras 4.21a e 4.21d), o que mostra que a “sujeira” está relacionada com o inter-espalhamento, as reflexões (nas paredes e nos suportes

mecânicos), o ruído de fundo, o ruído elétrico e com as componentes de distorção harmônica. A Figura 4.22 ilustra o diagrama de blocos completo da técnica proposta.

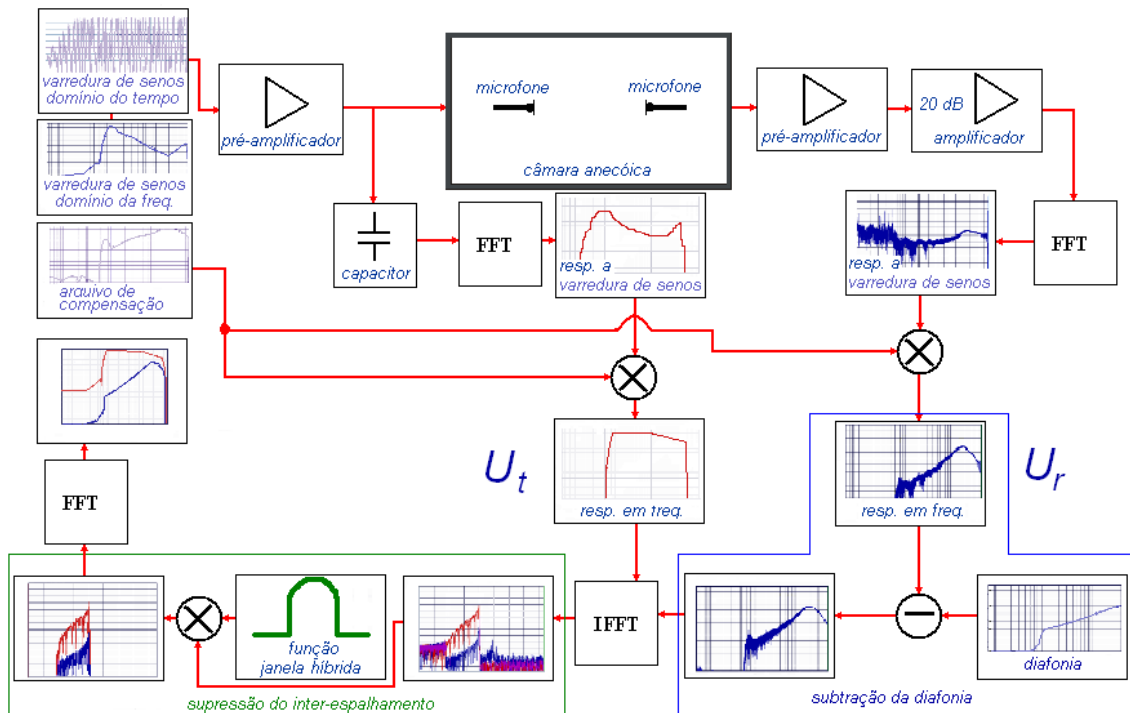


Figura 4.22 – Diagrama de blocos da técnica proposta incluindo a supressão do inter-espalhamento, das reflexões (nas paredes e nos suportes mecânicos), do ruído de fundo e das componentes de distorção harmônica.

4.3.3 Comparação entre a Técnica Proposta e Técnica Clássica

A fim de comparar a técnica proposta com a técnica clássica, calibrou-se um mesmo microfone em quatro distâncias diferentes: 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm. As Figuras 4.23 a 4.30 mostram os resultados das medições das tensões U_t e U_r para cada uma das distâncias, no domínio do tempo e no domínio da frequência.

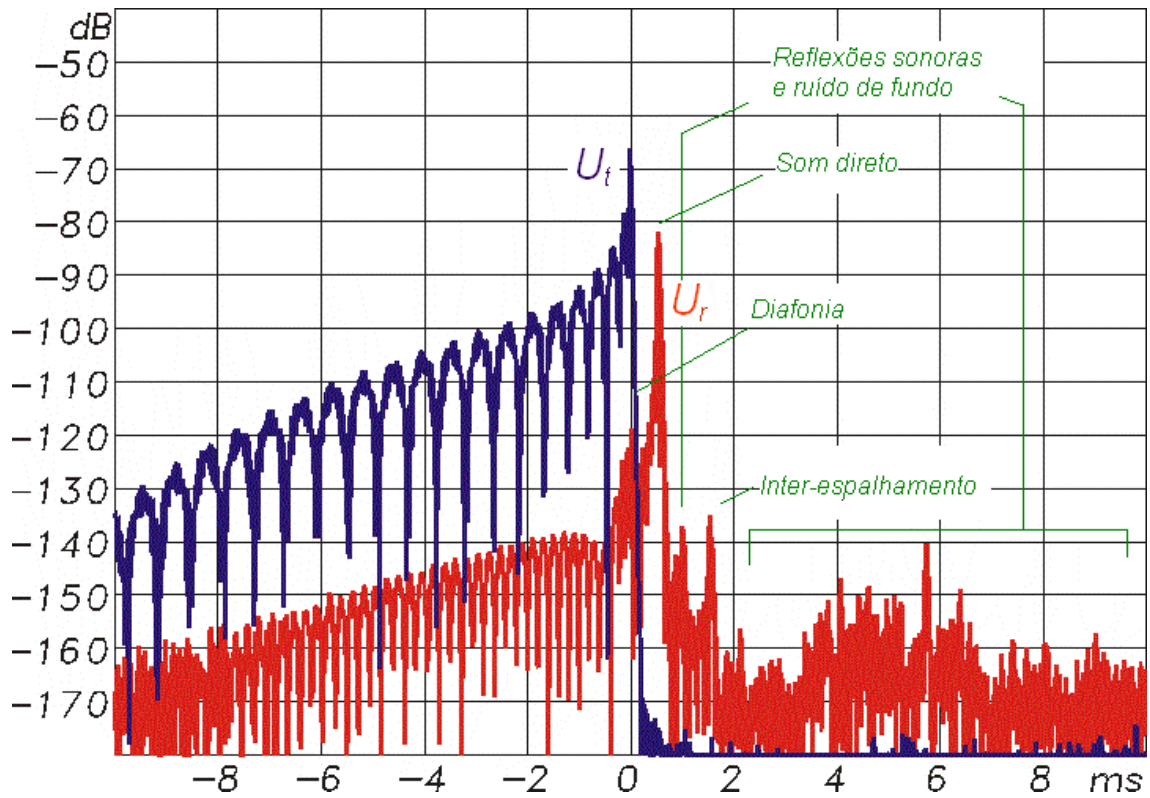


Figura 4.23 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 17 cm entre os microfones, no domínio do tempo.

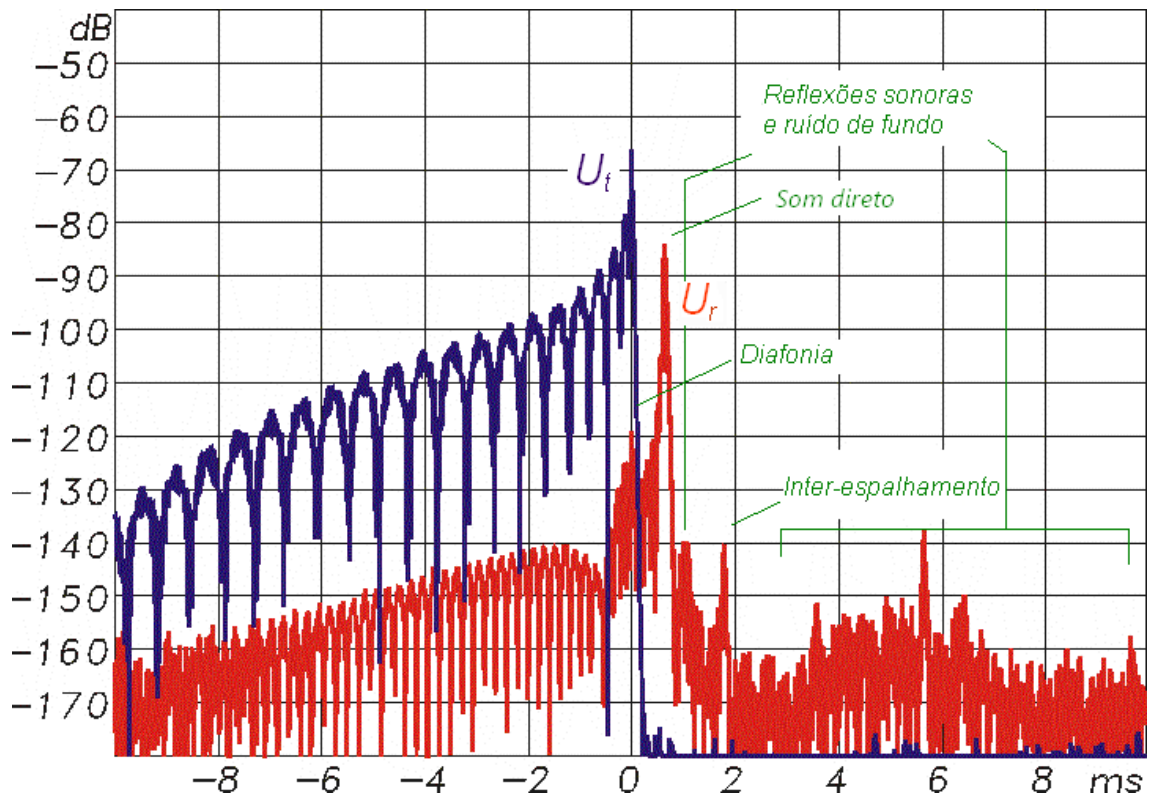


Figura 4.24 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 20 cm entre os microfones, no domínio do tempo.

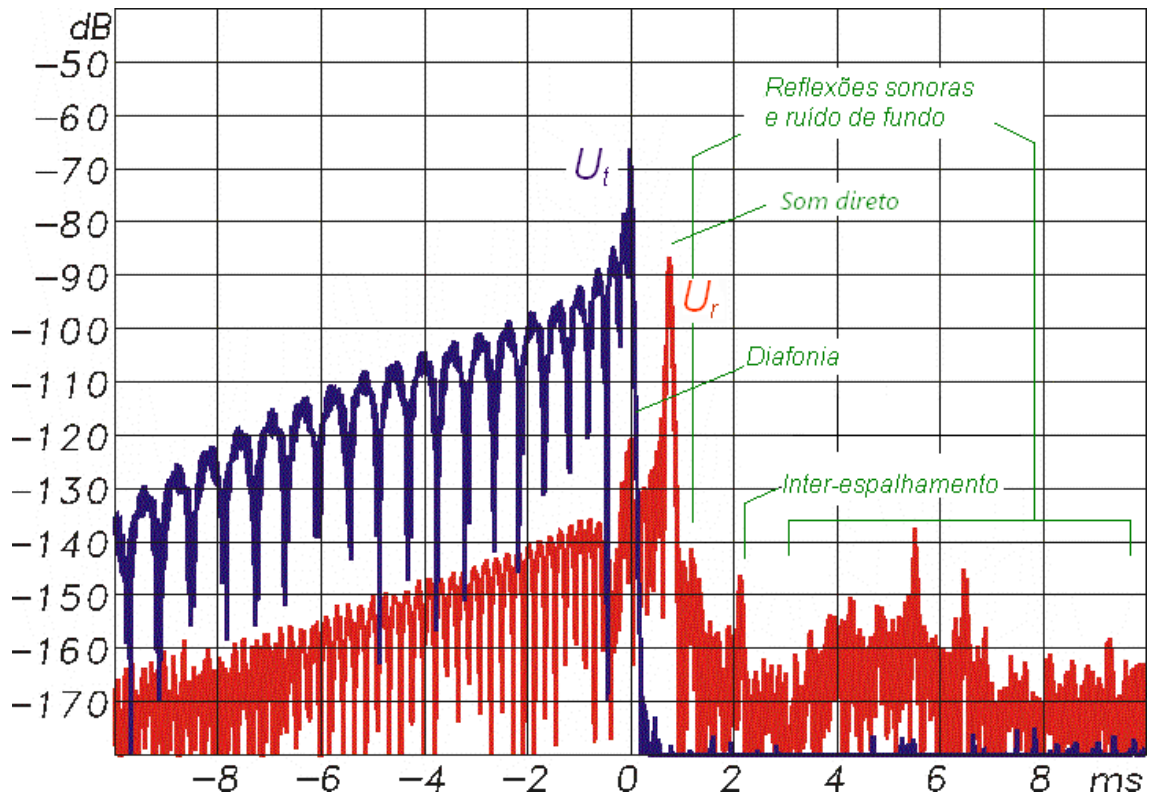


Figura 4.25 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 24 cm entre os microfones, no domínio do tempo.

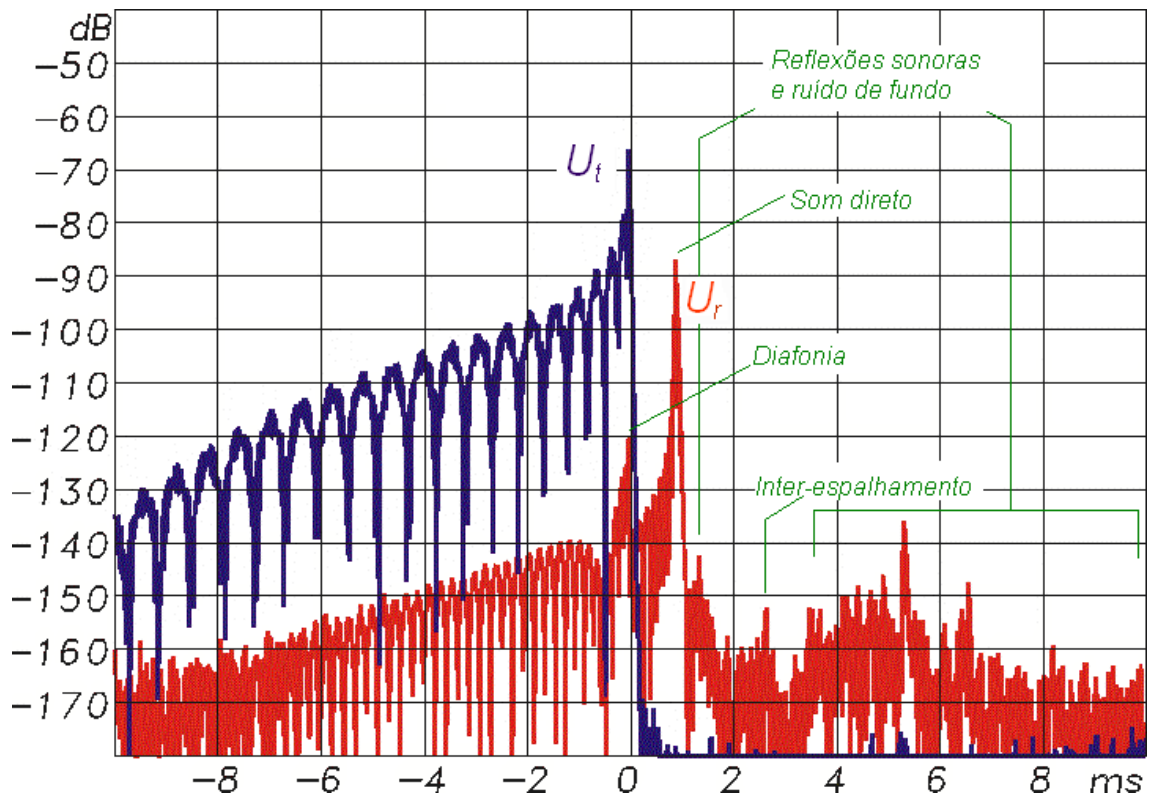


Figura 4.26 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 30 cm entre os microfones, no domínio do tempo.

A partir das Figuras 4.23 a 4.26, observa-se que, para todas as distâncias, a diafonia aparece na medição da tensão U_r no mesmo instante que se inicia a medição da tensão U_t e sua amplitude permanece constante. O som direto aparece aproximadamente 0,5 ms, 0,6 ms, 0,7 ms e 0,9 ms após o início da medição da tensão U_t , para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm. Esses são os tempos necessários para que o som percorra as distâncias que separam os dois microfones. A amplitude do som direto cai à medida que se aumenta a distância devido ao aumento da sua absorção pelo ar. O inter-espalhamento aparece aproximadamente 1,5 ms, 1,8 ms, 2,1 ms e 2,7 ms após o início da medição da tensão U_t . Esses são os tempos necessários para que o som percorra três vezes as distâncias que separam os dois microfones. A amplitude do inter-espalhamento diminui com o aumento da distância, como apontado por BARRERA-FIGUEROA [15]. Observa-se ainda, para todas as distâncias, um pico de energia aproximadamente 0,5 ms do som direto que se refere a reflexão na descontinuidade entre o pré-amplificador e a sua haste de sustentação. A amplitude desta reflexão cai com o aumento da distância, acompanhando a queda da amplitude do som direto. Finalmente, os picos de energia posteriores ao inter-espalhamento referem-se a reflexões (nas paredes da câmara anecóica), ao ruído de fundo, ao ruído elétrico e às componentes de distorção harmônica.

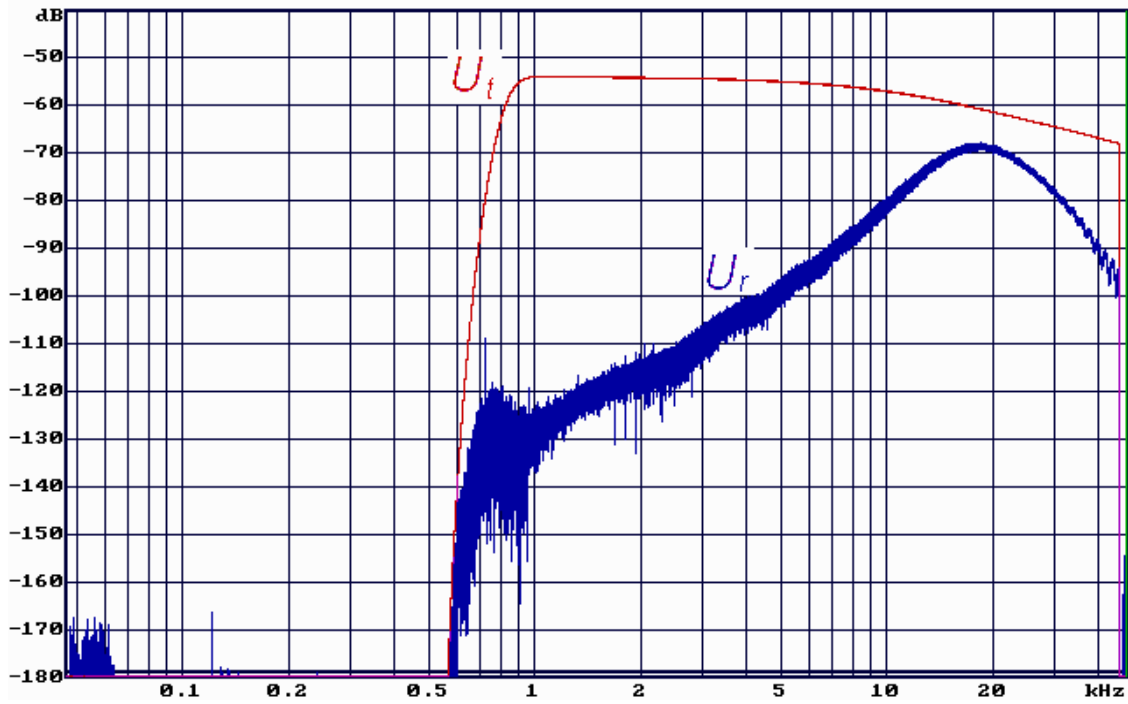


Figura 4.27 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 17 cm entre os microfones, no domínio da frequência.

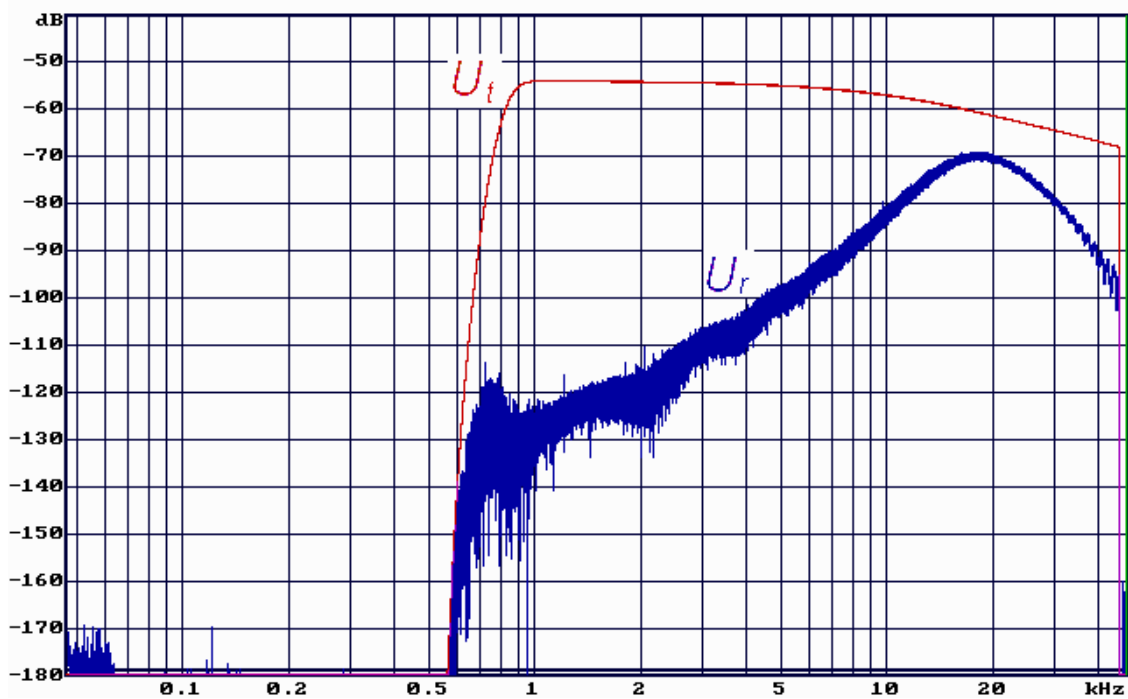


Figura 4.28 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 20 cm entre os microfones, no domínio da frequência.

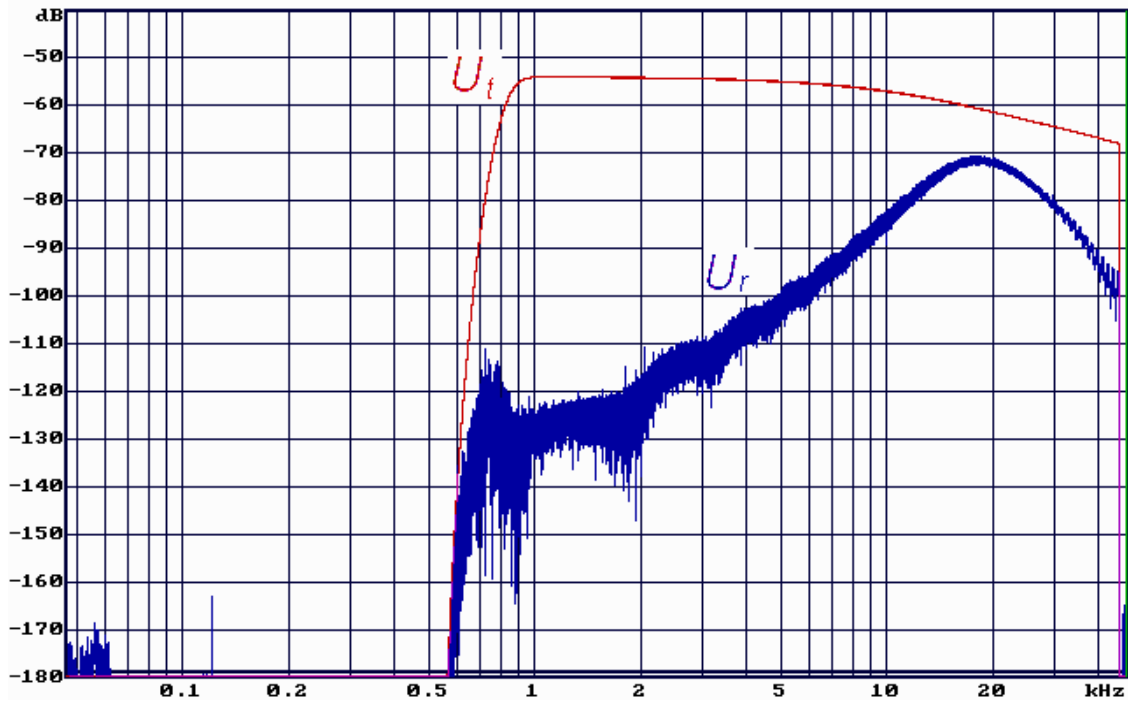


Figura 4.29 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 24 cm entre os microfones, no domínio da frequência.

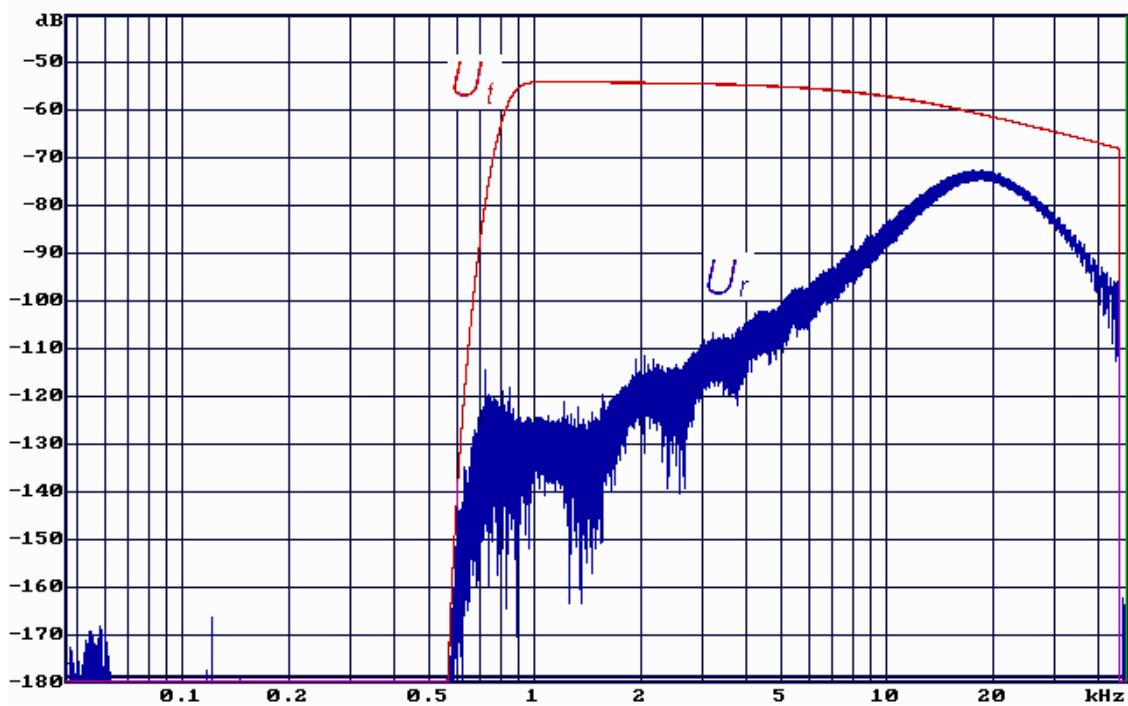


Figura 4.30 – Tensões U_t e U_r , para a distância de 30 cm entre os microfones, no domínio da frequência.

A partir das Figuras 4.27 a 4.30, observa-se que, para todas as distâncias, a tensão U_t medida sofre uma atenuação com o aumento da frequência. Esta atenuação é devida a um circuito RC (filtro passa-baixa) formado por um resistor de 10 k Ω , colocado na saída do sistema de medição, em série com o microfone fonte e com o capacitor utilizado para medir a tensão no microfone fonte. Observa-se ainda que, nas medições da tensão U_r , aparecem algumas ondulações que são causadas pela diafonia e que o período destas ondulações diminui a medida que se aumenta a distância entre os microfones. É possível relacionar a frequência destas ondulações com a distância entre a diafonia e o som direto segundo:

$$f_{\text{ondulação}} = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.1)$$

onde $f_{\text{ondulação}}$ é a frequência da ondulação e Δt é o intervalo de tempo entre a diafonia e o som direto. Assim, a partir das Figuras 4.23 a 4.26 podemos constatar que os intervalos de tempo entre a diafonia e o som direto são aproximadamente 0,5 ms, 0,6 ms, 0,7 ms e 0,9 ms para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm. Desta forma, as frequências das ondulações observadas são respectivamente 2 kHz, 1,7 kHz, 1,4 kHz e 1,1 kHz.

A Figura 4.31 mostra as sensibilidades de um mesmo microfone obtidas, com a técnica proposta, para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm e a sensibilidade média correspondente, utilizando essa proposta.

Observa-se que as sensibilidades apresentam uma concordância muito melhor que a apresentada na técnica clássica (ver Figura 4.3) e melhor que a apresentada na técnica de Barrera-Figueroa (ver Figura 4.7) e também, que seu comportamento está de acordo com o esperado para a sensibilidade de um microfone, isto é, não apresenta ondulações.

A Figura 4.32 compara as sensibilidades médias obtidas utilizando a técnica proposta, a técnica de Barrera-Figueroa e a técnica clássica.

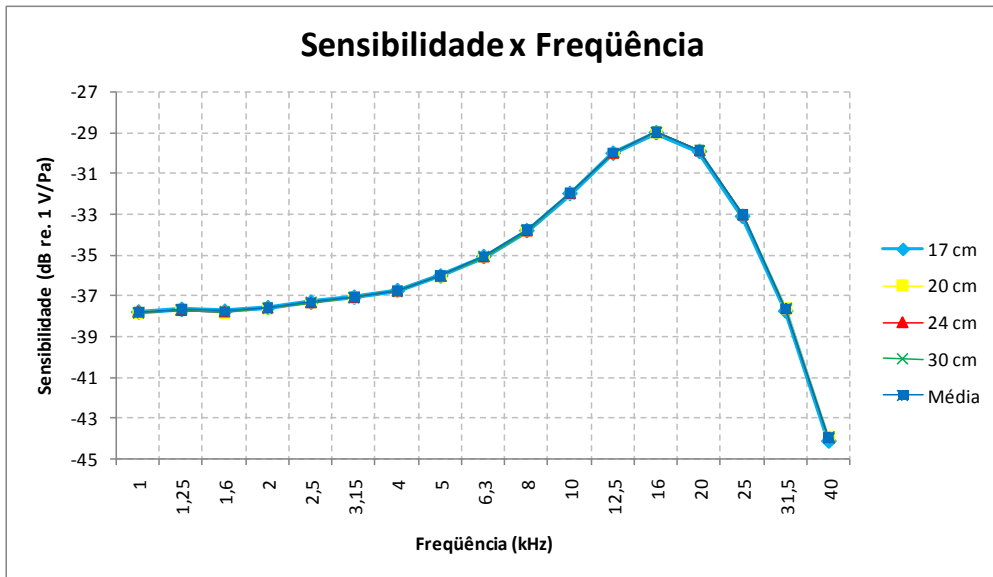


Figura 4.31 – Sensibilidades de um mesmo microfone obtidas utilizando a técnica proposta. As distâncias entre os microfones foram de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm.

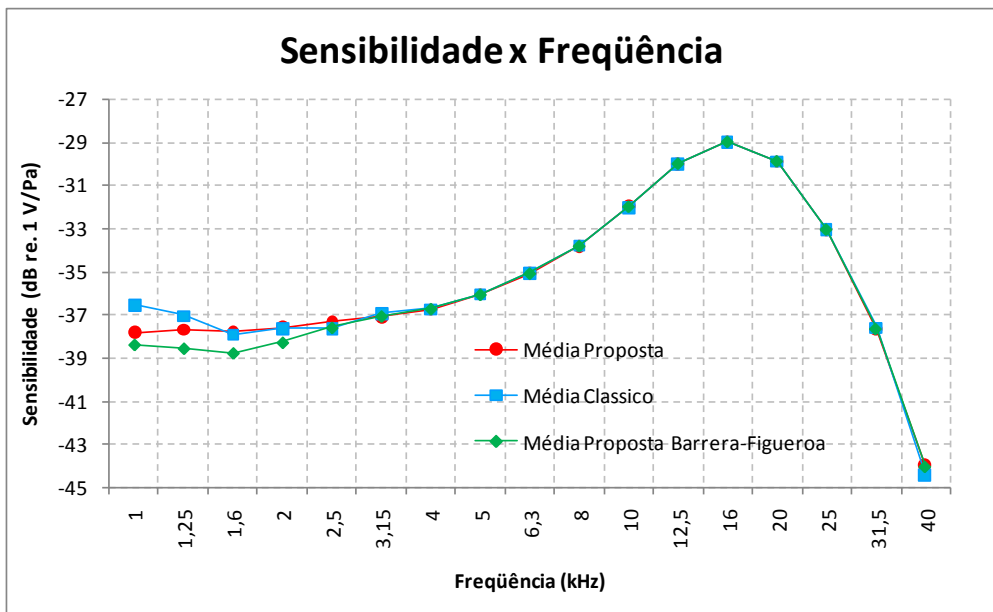


Figura 4.32 – Sensibilidades médias obtidas utilizando a técnica proposta, a técnica de Barrera-Figueroa e a técnica clássica.

4.3.4 Sistema de Medição

Para geração e aquisição dos sinais foi utilizado o sistema de medição Aurélio CMF22 desenvolvido no Inmetro, um amplificador de 20 dB também desenvolvido no Inmetro, um pré-amplificador B&K 2673, uma unidade transmissora B&K ZE0796, três

microfones LS2 B&K 4180 e um adaptador B&K JJ2615 (com capacitância de 20 pF) que simula um microfone. A Figura 4.33 apresenta o sistema de medição e a Figura 4.34 o respectivo diagrama de blocos.



Figura 4.33 – Sistema de medição.

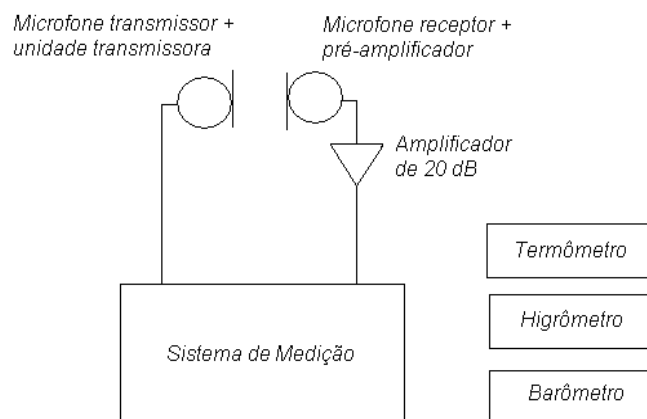


Figura 4.34 – Diagrama de blocos do sistema de medição.

Num sistema de medição por reciprocidade tradicionalmente se utiliza um cabo com sete fios e uma única malha. Esse cabo possui um ruído elétrico de 1 mV. Neste trabalho, foi utilizado um cabo com três pares de fios sendo cada par envolto por uma malha. Esse cabo possui um ruído elétrico de 20 nV que representa uma redução de 94 dB. Assim, espera-se diminuir a “contaminação” dos sinais (de excitação e de saída),

o que permitindo que se utilizem cabos com comprimentos maiores. Para conduzir o sinal do sistema de medição ao microfone fonte e do microfone receptor ao sistema de medição, foram utilizados cabos de 10 m e 8 m de comprimento respectivamente.

No cabo que conduz o sinal do microfone receptor ao sistema de medição, junto ao pré-amplificador, foi montado um amplificador de 20 dB com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído.

Ao invés de se medir a corrente de entrada no terminal elétrico do microfone fonte, foi medida a tensão sobre um capacitor colocado em série com o microfone (ver Capítulo 3). O valor da capacitância do capacitor utilizado é de 4,759 nF em 250 Hz com uma incerteza de 0,05% para um nível de confiança de 95%.

A câmara anecóica utilizada foi construída especialmente para este trabalho (ver Figura 4.35) e possui, aproximadamente, 8,2 m³ de volume externo (aproximadamente: 2,02 m de largura, 1,82 m de profundidade e 2,23 m de altura), 2,8 m³ de volume interno (aproximadamente: 1,42 m de largura, 1,22 m de profundidade e 1,63 m de altura) e seu revestimento interno é feito com cunhas de lã de rocha (em média: 0,10 m x 0,10 m de base, 0,10 m de altura da base, 0,30 m de altura total, ângulo de 15° e densidade de 90 kg/m³). Ela possui um ventilador e um exaustor, localizados no teto, responsáveis pela troca do ar do seu interior com o exterior. Essa troca é necessária para remover gases evaporados da cola utilizada para a fixação das cunhas e evaporados das próprias cunhas, que modificam as características de absorção do som no ar [15]. Além disso, mantém a temperatura e umidade no interior da câmara próximas da temperatura e umidade no exterior.

Dentro da câmara anecóica, foram instaladas duas hastes para a fixação dos microfones. A haste para a fixação do microfone receptor é fixa, possui comprimento de 0,80 m e diâmetro de meia polegada. A haste para fixação do microfone fonte é móvel (transpassando a câmara anecóica) e é controlada em passos de 1 mm, por uma unidade de controle linear. Ela possui comprimento de 2,00 m e diâmetro também igual aos dos microfones LS2. As dimensões das hastes atendem à IEC 61094-3 [4] que especifica que os microfones devem ser fixados em hastes de diâmetro igual ao diâmetro nominal do microfone e de comprimento grande se comparado ao esse diâmetro. A IEC 61094-3 especifica ainda que esse comprimento deve ser, no mínimo, dez vezes o diâmetro nominal do microfone com a terminação gradualmente afilada. Na prática, esta especificação foi atendida fazendo-se as hastes “mergulharem” nas cunhas de lã de rocha que revestem o interior da câmara anecóica.



Figura 4.35 – Vista da câmara anecóica utilizada.

A descontinuidade entre o pré-amplificador que sustenta o microfone receptor e a sua haste de sustentação foi reduzida com a utilização de fita adesiva (ver Figura 4.36). Essa descontinuidade gera uma reflexão, que é captada pelo microfone receptor. Essa reflexão foi identificada por BARRERA-FIGUEROA [15] que propôs a utilização de fita adesiva para a sua redução.



Figura 4.36 – a) descontinuidade entre o pré-amplificador e a haste; b) redução desta descontinuidade com a utilização de fita adesiva.

4.3.5 Resultados

A sensibilidade foi calculada para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm, sendo também calculada a sensibilidade média correspondente. Para o estudo da repetitividade do resultado das medições, o procedimento acima foi repetido quatro vezes e a sensibilidade declarada foi a média entre as sensibilidades médias. O Apêndice C apresenta a primeira medição e cada uma das quatro repetições para o microfone número de série 2564045 utilizando a técnica proposta. A Tabela 4.1 e a Figura 4.37 apresentam a sensibilidade declarada para o mesmo microfone utilizando a técnica proposta.

Tabela 4.1 – Sensibilidade declarada para o microfone nº de série 2564045 utilizando a técnica proposta.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)
1	- 37,83
1,25	- 37,80
1,6	- 37,74
2	- 37,62
2,5	- 37,44
3,15	- 37,19
4	- 36,79
5	- 36,16
6,3	- 35,21
8	- 33,83
10	- 32,13
12,5	- 30,28
16	- 29,00
20	- 29,89
25	- 32,92
31,5	- 37,45
40	- 43,82

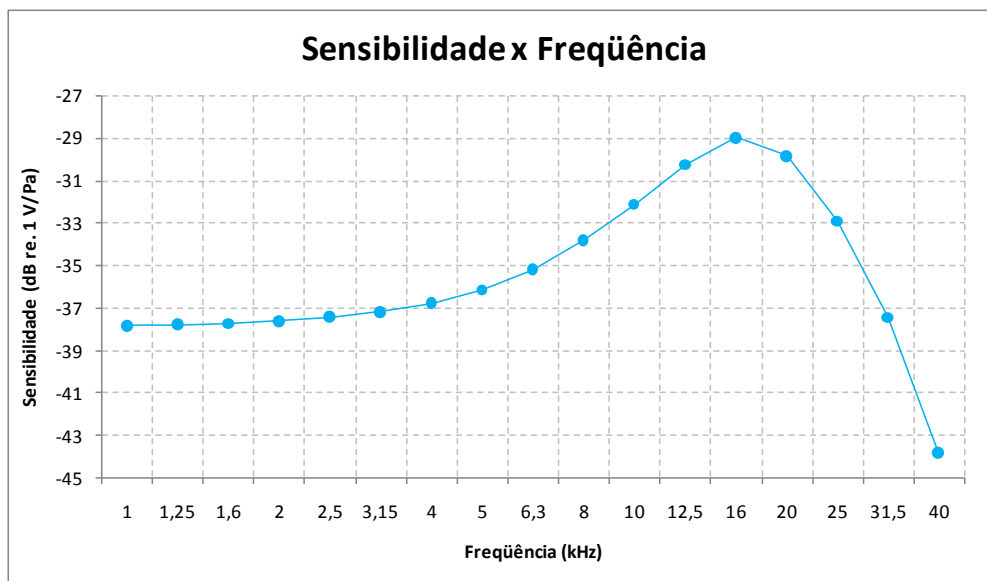


Figura 4.37 – Sensibilidade declarada para o microfone nº de série 2564045 utilizando a técnica proposta.

Para que a sensibilidade possa retratar a sensibilidade sob condições ambientais de referência e não sob as condições ambientais do laboratório, foi aplicada a correção com os valores de a_0 tabelados e com o valor médio da frequência de ressonância apresentado por RASMUSSEN [16].

Para a determinação da impedância de transferência acústica o cálculo de ρ foi realizado seguindo a Equação (A.5) e o cálculo de α foi realizado seguindo a Equação (B.6). Durante as medições, a temperatura, a pressão estática, a umidade relativa, a concentração molar do vapor d'água e as taxas frequência-pressão estiveram dentro dos limites descritos nos procedimentos (Apêndices A e B).

Neste trabalho, o objetivo foi identificar e remover as imperfeições na determinação da impedância de transferência elétrica e não aperfeiçoar a determinação do centro acústico. Portanto, para a determinação da impedância de transferência acústica foram utilizados os valores de centro acústico apresentados pela IEC 61094-3 [4] para as frequências de 1 kHz até 20 kHz e os apresentados por BARRERA-FIGUEROA *et al* [21] para as frequências de 25 kHz, 31,5 kHz (tomado como a média entre os valores para 31 kHz e 32 kHz) e 40 kHz. Foram medidas a profundidade da cavidade frontal de cada um dos microfones envolvidos e as distância entre as superfícies de suas cavidades frontais. Assim, o cálculo da distância entre os centros acústicos dos microfones foi feito utilizando-se a relação:

$$d_{ij} = x_{ij} - D_i - D_j = (l_{ij} + p_i + p_j) - D_i - D_j \quad (4.2)$$

onde l_{ij} é a distância entre as superfícies das cavidades frontais dos microfones i e j e p_i é a profundidade da cavidade frontal do microfone i .

CAPÍTULO 5

CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

5.1 Introdução

A declaração do resultado de uma medição somente é completa se contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor [31]. Segundo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [32], conhecido como Guia, incerteza de medição é o “*parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando*”. Neste capítulo serão apresentadas as incertezas de medição associadas aos valores atribuídos à sensibilidade do microfone para cada frequência.

5.1.1. Avaliação da Incerteza de Medição das Estimativas de Entrada

A incerteza de medição associada às estimativas de entrada pode ser avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B [31].

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão, $u(x_i)$, é dada pelo desvio padrão experimental da média, $s(\bar{x})$:

$$u(x_i) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

onde n é o número de observações estatisticamente independentes ($n > 1$) e $s(x)$ é o desvio padrão experimental, dado por:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

onde x_j é o valor da j -ésima medição e \bar{x} é o valor médio.

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza é feita pelo julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de uma grandeza de entrada. Valores pertencentes a esta categoria podem ser obtidos a partir de: dados de medições anteriores, experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes, especificações do fabricante, dados provenientes de calibração e de outros certificados, e incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações.

Quando os limites inferior e superior, a_- e a_+ , para o valor da grandeza podem ser estimados, uma distribuição de probabilidade retangular deve ser suposta para a possível variabilidade da grandeza. Assim o valor estimado, x_i , deve ser a média entre esses limites enquanto que a incerteza padrão deve ser calculada através de:

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{12}} (a_+ - a_-) \quad (5.3)$$

Quando o intervalo entre a_+ e a_- for simétrico em relação a x_i , a incerteza padrão pode ser calculada através de:

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{3}} a_+ \quad (5.4)$$

Se a grandeza de entrada for calibrada, o certificado de calibração deverá informar o valor estimado, bem como a incerteza expandida, U . O certificado deverá informar também o valor do fator abrangência k , o tipo de distribuição e a probabilidade de abrangência. Dessa forma a incerteza padrão deve ser calculada através de:

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (5.5)$$

5.1.2. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada

Para grandezas de entrada não correlacionadas o quadrado da incerteza padrão combinada é dado por [31]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (5.6)$$

onde $u(y)$ é a incerteza padrão combinada, $u_i(y)$ é a contribuição à incerteza padrão combinada, resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada; e é calculada a partir de:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (5.7)$$

onde c_i é o coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada, isto é, a derivada parcial da função modelo F com relação a grandeza X_i , avaliada para as estimativas de entrada,

$$c_i = \frac{\partial F}{\partial X_i} \quad (5.8)$$

O coeficiente de sensibilidade descreve o quanto a estimativa de saída é influenciada por variações da estimativa de entrada.

Já a confiabilidade da incerteza padrão combinada é determinada por seu grau de liberdade efetivo, ν_{eff} , de acordo com:

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (5.9)$$

onde ν_i são os graus de liberdade efetivo da contribuição à incerteza padrão combinada.

Para uma incerteza padrão obtida de uma avaliação do Tipo A os graus de liberdade são iguais a $n - 1$. Para uma incerteza padrão obtida de uma avaliação do Tipo B é uma prática comum efetuar tais avaliações de maneira a evitar qualquer sub-

estimativa. Sob a hipótese de que esta prática seja seguida, os graus de liberdade da incerteza padrão obtidos de uma avaliação do Tipo B podem ser assumidos como tendendo ao infinito [31].

5.1.3. Cálculo da Incerteza Expandida

No âmbito do *European Co-operation for Accreditation* (EA) decidiu-se que os laboratórios acreditados pelos membros do EA devem declarar uma incerteza de medição expandida, obtida pela multiplicação da incerteza padrão por um fator de abrangência.

Nos casos em que uma distribuição normal possa ser atribuída ao mensurando e a incerteza padrão combinada tenha suficiente confiabilidade, o fator de abrangência padronizado $k = 2$ deve ser utilizado. A incerteza expandida atribuída corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Essas condições são satisfeitas na maioria dos casos de calibração. O uso da mesma probabilidade de abrangência é essencial para que dois resultados de medição da mesma grandeza possam ser comparados.

A hipótese de uma distribuição normal, entretanto, nem sempre pode ser facilmente confirmada experimentalmente. Nos casos em que vários componentes de incerteza (isto é, $N \geq 3$) derivados de grandezas independentes e de distribuições de probabilidade bem comportadas, por exemplo, distribuições normais ou distribuições retangulares, contribuem para a incerteza padrão combinada com quantidades comparáveis, pode se supor, com um alto grau de aproximação, que a distribuição da grandeza de saída é uma distribuição normal [31].

5.2 Cálculo da Incerteza de Medição na Calibração por Reciprocidade em Campo Livre

A seguir é apresentado o cálculo da incerteza expandida da sensibilidade para a frequência de 1 kHz. Cálculos semelhantes foram utilizados para as demais frequências em que o microfone foi calibrado.

5.2.1 Determinação da Sensibilidade em Campo Livre para as Condições Ambientais de Medição

Como visto no Capítulo 3 (Equações (3.37), (3.38) e (3.39)), a sensibilidade para as condições ambientais de medição é calculada a partir de:

$$M_{f,a} = \left[\frac{1}{\pi \rho f^2 C_x} \frac{U_{r,b} U_{r,c} U_{t,b} d_{ab} d_{ac}}{U_{t,a} U_{t,a} U_{r,c} d_{bc}} e^{\alpha(d_{ab}+d_{ac}-d_{bc})} \right]^{1/2} \quad (5.10)$$

Os erros sistemáticos cometidos nas medições de $U_{r,b}$ e $U_{r,c}$ são os mesmos, pois as tensões têm a mesma ordem de grandeza e são medidas com o mesmo instrumento. Pelos mesmos motivos os erros sistemáticos cometidos nas medições de $U_{t,a}$ e $U_{t,b}$ também são os mesmos. Assim, os erros associados às razões de tensões se cancelam (na multiplicação) sobrando apenas os erros associados a uma componente de razão de tensão (U_r/U_t) [33]. Da mesma forma os erros sistemáticos associados às distâncias entre os centros acústicos são os mesmos, pois as distâncias também têm a mesma ordem de grandeza e são medidas com o mesmo instrumento. Assim, os erros associados às distâncias se cancelam (na subtração) sobrando apenas os erros associados a uma componente de distância. Deste modo, a função modelo para o cálculo da incerteza de medição é:

$$M_f = \left[\frac{1}{\pi \rho f^2 C_x} \frac{U_r}{U_t} d e^{\alpha d} \right]^{1/2} \quad (5.11)$$

A partir desta função calcula-se a contribuição de cada um dos seus termos para a incerteza padrão combinada. A Tabela 5.1 apresenta a planilha de incerteza associada a esta função.

Tabela 5.1(a) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.11). Parte 1.

Grandeza	Estimativa	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão
X_i	x_i	-	$u(x_i)$
ρ	1,189 1 kg/m ³	retangular	0,000 058 kg/m ³
f	1 000 Hz	retangular	0,052 858 Hz
C_x	4,759·10 ⁻⁹ F	normal	0,001 19·10 ⁻⁹ F
U_r/U_t	0,000 017	retangular	1,98·10 ⁻⁸
d	0,161 m	retangular	0,001 732 m
α	0,000 556 m ⁻¹	retangular	0,000 032 m ⁻¹

Tabela 5.1(b) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.11). Parte 2.

Grandeza	Coeficiente de sensibilidade		Contribuição para a incerteza padrão combinada
X_i	$c_i = \frac{\partial F}{\partial X_i}$		$u_i(y)$
ρ	$-\frac{1}{2}M_f\rho^{-1}$	- 0,005 262 (V/Pa)(m ³ /kg)	- 3·10 ⁻⁷ V/Pa
f	$-M_f f^{-1}$	- 0,000 013 (V/Pa)(1/Hz)	- 7·10 ⁻⁷ V/Pa
C_x	$-\frac{1}{2}M_f C_x^{-1}$	1 314 768,038 (V/Pa)(1/F)	- 16·10 ⁻⁷ V/Pa
U_r/U_t	$\frac{1}{2}M_f \left(\frac{U_r}{U_t}\right)^{-1}$	364,560 337 (V/Pa)	72·10 ⁻⁷ V/Pa
d	$\frac{1}{2}M_f [d^{-1} + \alpha]$	0,038 918 (V/Pa)(1/m)	- 674·10 ⁻⁷ V/Pa
α	$\frac{1}{2}M_f d$	0,001 006 (V/Pa)(m)	- 0,3·10 ⁻⁷ V/Pa

A partir dessa planilha calcula-se a incerteza de medição associada à função modelo (5.11):

- Incerteza padrão combinada, $u(y)$: 0,000 068 V/Pa;
- Incerteza expandida, U : 0,000 136 V/Pa ou 0,094 dB re. 1 V/Pa, para um fator de abrangência $k = 2$;
- Distribuição de probabilidade: normal;
- Probabilidade de abrangência: aproximadamente 95%.

5.2.2 Correção da Sensibilidade para as Condições Ambientais de Referência

Como visto no Capítulo 3 (Equações (3.13) e (3.14)), a correção da sensibilidade para as condições ambientais de referência é feita segundo:

$$M_{f,dB,ref} = M_{f,dB,cm} + \left[a_{0,p} + a_{1,p} \left(\frac{f}{f_0} \right) + a_{2,p} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \dots + a_{9,p} \left(\frac{f}{f_0} \right)^9 \right] (p_{s,r} - p_s) + \left[a_{0,T} + a_{1,T} \left(\frac{f}{f_0} \right) + a_{2,T} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \dots + a_{9,T} \left(\frac{f}{f_0} \right)^9 \right] (T_r - T) \quad (5.12)$$

onde $M_{f,dB,ref}$ é a sensibilidade em campo livre, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de referência e $M_{f,dB,cm}$ é a sensibilidade em campo livre, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de medição.

A incerteza desta correção é determinada pelas incertezas dos valores dos coeficientes para baixas frequências e da frequência de ressonância [16].

Tomando a Equação (5.12) como função modelo, calcula-se a contribuição de cada um dos seus termos para a incerteza padrão combinada. A Tabela 5.2 apresenta a planilha de incerteza associada a esta função.

Tabela 5.2(a) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.12). Parte 1.

Grandeza	Estimativa	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão
X_i	x_i	-	$u(x_i)$
$M_{f,dB,cm}$	- 38,052 dB	normal	0,047 dB
$a_{0,p}$	- 0,005 19 dB/kPa	retangular	0,000 693 dB/kPa
f_0	22 340 Hz	retangular	969,948 452 Hz
p_s	100,931 kPa	normal	0,150 kPa
$a_{0,T}$	- 0,001 2 dB/K	retangular	0,001 328 dB/K
T	294,48 K	normal	0,151 K

Tabela 5.2(b) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.12). Parte 2.

Grandeza	Coeficiente de sensibilidade		Contribuição para a incerteza padrão combinada
X_i	$c_i = \frac{\partial F}{\partial X_i}$		$u_i(y)$
$M_{f,dB,cm}$	1	1	0,047 dB
$a_{0,p}$	$(p_{s,ref} - p_s)$	0,394 kPa	0,000 273 dB
f_0	*	$2 \cdot 10^{-8}$ dB/Hz	0,000 021 dB
p_s	**	0,005 652 dB/kPa	0,000 848 dB
$a_{0,T}$	$(T_{ref} - T)$	1,67 K	0,002 218 dB
T	***	0,001 276 dB/K	0,000 192 dB

$$\begin{aligned}
 & \left[a_{1,p} \left(-\frac{f}{f_0^2} \right) + a_{2,p} \left(-2 \frac{f^2}{f_0^3} \right) + \dots + a_{9,p} \left(-9 \frac{f^9}{f_0^{10}} \right) \right] (p_{s,ref} - p_s) + \\
 * & \left[a_{1,T} \left(-\frac{f}{f_0^2} \right) + a_{2,T} \left(-2 \frac{f^2}{f_0^{-3}} \right) + \dots + a_{9,T} \left(-9 \frac{f^9}{f_0^{-10}} \right) \right] (T_{ref} - T) \\
 ** & - \left[a_{0,p} + a_{1,p} \left(\frac{f}{f_0} \right) + a_{2,p} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \dots + a_{9,p} \left(\frac{f}{f_0} \right)^9 \right] \\
 *** & - \left[a_{0,T} + a_{1,T} \left(\frac{f}{f_0} \right) + a_{2,T} \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 + \dots + a_{9,T} \left(\frac{f}{f_0} \right)^9 \right]
 \end{aligned}$$

A partir dessa planilha calcula-se a incerteza de medição associada à função modelo (5.12):

- Incerteza padrão combinada, $u(y)$: 0,046 879 dB re. 1 V/Pa;
- Incerteza expandida, U : 0,094 dB re. 1 V/Pa, para um fator de abrangência $k = 2$;
- Distribuição de probabilidade: normal;
- Probabilidade de abrangência: aproximadamente 95%.

5.2.3 Demais Fontes de Incerteza

Além dessas grandezas de entrada existem outras que, devido a sua aleatoriedade ou à falta de informações mais detalhadas, são associadas à sensibilidade sob a forma de correções. Estas correções são assumidas como nulas, mas com incertezas padrões não nulas,

$$M_{f,dB,ref,cor} = M_{f,dB,ref} + Pol + Jan + Diaf + Desv + Arred_2 \quad (5.13)$$

onde

$M_{f,dB,ref,cor}$ é a sensibilidade em campo livre, em dB referenciada a 1 V/Pa, nas condições ambientais de referência, corrigida;

Pol é a correção para a variação da tensão de polarização de 200 V;

Jan é a correção para as ondulações causadas pela função janela;

$Diaf$ é a correção para as ondulações caudadas pela subtração da diafonia;

$Desv$ é a correção para os desvios em relação a média;

$Arred_2$ é a correção em função do arredondamento para duas casas decimais.

As correções para as ondulações causadas pela função janela (Jan), para as ondulações causadas pela subtração da diafonia ($Diaf$) e para os desvios em relação a média ($Desv$) com suas respectivas incertezas padrão são características exclusivas da técnica proposta neste trabalho para determinação da impedância de transferência elétrica. A Tabela 5.3 apresenta a planilha de incerteza associada à função modelo (5.13).

Tabela 5.3(a) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.13). Parte 1.

Grandeza	Estimativa	Distribuição de probabilidade	Incerteza padrão
X_i	x_i	-	$u(x_i)$
$M_{f,ref,cor, dB}$	- 38,056 dB	normal	0,047 dB
Pol	0 dB	retangular	0,025 dB
Jan	0 dB	retangular	0,029 dB
$Diaf$	0 dB	retangular	0,001 dB
$Desv$	0 dB	retangular	0 dB
$Arred_2$	0 dB	retangular	0,003 dB
$Repet$	0 dB	normal	0,010 dB

Tabela 5.3 (b) – Planilha de incerteza associada à função modelo (5.13). Parte 2.

Grandeza	Coeficiente de sensibilidade		Contribuição para a incerteza padrão combinada
X_i	$c_i = \frac{\partial F}{\partial X_i}$		$u_i(y)$
$M_{f,ref, cor, dB}$	1	1	0,047 dB
Pol	1	1	0,025 dB
Jan	1	1	0,029 dB
$Diaf$	1	1	0,001 dB
$Desv$	1	1	0 dB *
$Arred_2$	1	1	0,003 dB
$Repet$	- **	- **	0,010 dB

* Cinco medições para a determinação da impedância de transferência elétrica foram feitas, resultando em cinco valores para a sensibilidade. Na análise dos dados, algumas medições apresentaram um desvio em relação à média a partir da frequência de 6,3 kHz. A medição que apresentou um desvio maior que 0,15 dB foi descartada. Quando duas ou mais medições apresentaram desvios maiores que 0,15 dB em relação à média, as cinco medições foram descartadas e novas medições foram feitas. Para estimar esta incerteza identificou-se o maior desvio para cada frequência e dividiu-se por $n - 1$. Como para 1 kHz não foi observado nenhum desvio, essa fonte de incerteza foi desconsiderada. A contribuição para a incerteza padrão combinada para as frequências a partir de 6,3 kHz podem ser conferidas na Tabela 5.4.

** Avaliação do Tipo A da incerteza padrão. Neste caso a incerteza padrão é dada pelo desvio padrão experimental da média, não existindo o cálculo do coeficiente de sensibilidade.

A partir dessa planilha calcula-se a incerteza de medição associada à função modelo (5.13), a incerteza final do método utilizando a técnica proposta:

- Incerteza padrão combinada: 0,056 025 dB re. 1 V/Pa;
- Incerteza expandida, U : 0,11 dB re. 1 V/Pa, para um fator de abrangência $k = 2$;
- Distribuição de probabilidade: normal;
- Probabilidade de abrangência: aproximadamente 95%.

A Tabela 5.4 apresenta as contribuições para a incerteza padrão combinada bem como as incertezas padrão combinada e expandida (para um fator de abrangência $k = 2$ e uma probabilidade de aproximadamente 95%) para as frequências centrais das bandas de terço de oitava, de 1 kHz a 40 kHz. Observa-se que a incerteza expandida aumenta com o aumento da frequência. Esse aumento acompanha o aumento das contribuições para a incerteza padrão combinada das “grandezas” *Diap* e *Desv*.

A Figura 5.1 mostra as incertezas padrão de repetitividade, padrão combinada e expandida. Observa-se que a contribuição da incerteza padrão de repetitividade (avaliação do Tipo A da incerteza padrão) para a incerteza padrão combinada e, conseqüentemente, para a incerteza expandida, é pequena.

A Figura 5.2 e a Tabela 5.5 comparam a incerteza expandida estimada neste trabalho com as estimadas por alguns institutos nacionais de metrologia (LNE da França, NIST dos Estados Unidos e DPLA da Dinamarca) utilizando outras técnicas de medição. Observa-se que a incerteza estimada neste trabalho é da mesma ordem de grandeza das estimadas por esses INMs.

Tabela 5.4 (a) – Contribuições para a incerteza padrão combinada, incerteza padrão combinada e incerteza expandida. Parte 1.

Grandeza	1 kHz	1,25 kHz	1,6 kHz	2 kHz	2,5 kHz	3,15 kHz	4 kHz	5 kHz	6,3 kHz
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (V/Pa)									
ρ	-3,0E-07	-3,1E-07	-3,1E-07	-3,1E-07	-3,2E-07	-3,3E-07	-3,4E-07	-3,7E-07	-6,2E-05
f	-6,6E-07	-5,4E-07	-4,2E-07	-3,4E-07	-2,8E-07	-2,3E-07	-1,9E-07	-1,6E-07	-1,4E-07
C_x	-1,6E-06	-1,6E-06	-1,6E-06	-1,6E-06	-1,7E-06	-1,7E-06	-1,8E-06	-1,9E-06	-2,1E-06
d_m	6,7E-05	6,9E-05	6,8E-05	6,9E-05	7,1E-05	7,3E-05	7,5E-05	8,1E-05	9,0E-05
$U_{r,m}/U_{t,m}$	7,2E-06	7,4E-06	7,3E-06	7,4E-06	7,7E-06	7,9E-06	8,2E-06	8,9E-06	9,9E-06
α	3,2E-08	4,0E-08	5,3E-08	7,0E-08	1,0E-07	1,5E-07	2,3E-07	3,8E-07	6,5E-07
Incerteza Padrão Combinada (V/Pa)									
$M_{f,1}$	6,8E-05	6,9E-05	6,8E-05	6,9E-05	7,1E-05	7,3E-05	7,6E-05	8,2E-05	1,1E-04
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)									
$M_{f,1}$	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,6E-02	4,6E-02	4,6E-02	4,6E-02	5,5E-02
$a_{0,p}$	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04
f_0	2,1E-05	2,8E-05	3,9E-05	5,2E-05	6,7E-05	8,8E-05	1,3E-04	2,0E-04	3,5E-04
p_s	8,5E-04	8,4E-04	8,1E-04	1,6E-03	7,2E-04	6,4E-04	5,4E-04	4,0E-04	1,7E-04
$a_{0,T}$	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03
T	1,9E-04	2,1E-04	2,3E-04	2,6E-04	3,0E-04	3,5E-04	4,3E-04	5,4E-04	7,2E-04
Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)									
$M_{f,1ref}$	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,6E-02	4,6E-02	4,6E-02	5,5E-02
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)									
$M_{f,1ref}$	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,7E-02	4,6E-02	4,6E-02	4,6E-02	5,5E-02
Pol	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03
Jan	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	1,9E-02	8,9E-03	3,9E-03	0,0E+00
$Diaf$	1,0E-03	2,0E-03	3,0E-03	4,0E-03	5,0E-03	6,0E-03	7,0E-03	8,0E-03	1,0E-02
$Desv$	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	-3,1E-02
$Arred_2$	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03
$Repet$	1,0E-02	5,8E-03	6,3E-03	4,5E-03	2,8E-03	6,3E-03	2,9E-03	3,3E-03	3,2E-03
Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)									
$M_{f,1,ref,corr}$	5,6E-02	5,5E-02	5,5E-02	5,5E-02	5,5E-02	5,1E-02	4,8E-02	4,7E-02	6,4E-02
Incerteza Expandida (dB re. 1 V/Pa)									
$M_{f,1,ref,corr}$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,13

Tabela 5.4 (b) – Contribuições para a incerteza padrão combinada, incerteza padrão combinada e incerteza expandida. Parte 2.

Grandeza	8 kHz	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (V/Pa)								
ρ	-4,8E-07	-5,9E-07	-7,4E-07	-8,2E-07	-7,4E-07	-5,2E-07	-3,1E-07	-1,5E-07
f	-1,3E-07	-1,3E-07	-1,3E-07	-1,1E-07	-8,1E-08	-4,5E-08	-2,1E-08	-8,4E-09
C_x	-2,5E-06	-3,0E-06	-3,8E-06	-4,2E-06	-3,8E-06	-2,7E-06	-1,6E-06	-7,9E-07
d_m	1,0E-04	1,3E-04	1,6E-04	1,7E-04	1,6E-04	1,1E-04	2,8E-05	1,6E-05
$U_{r,m}/U_{t,m}$	1,1E-05	1,4E-05	1,8E-05	1,9E-05	1,8E-05	1,2E-05	7,3E-06	3,6E-06
α	1,2E-06	2,2E-06	4,1E-06	7,0E-06	9,2E-06	9,1E-06	7,4E-06	4,9E-06
Incerteza Padrão Combinada (V/Pa)								
$M_{f,1}$	1,0E-04	1,3E-04	1,6E-04	1,8E-04	1,6E-04	1,1E-04	3,0E-05	1,7E-05
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)								
$M_{f,1}$	4,6E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	2,1E-02	2,3E-02
$a_{0,p}$	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04
f_0	6,3E-04	9,8E-04	1,1E-03	3,2E-04	-1,7E-03	-2,8E-03	-5,7E-04	4,0E-03
p_s	-2,4E-04	-7,8E-04	-1,2E-03	-2,8E-04	2,8E-03	6,7E-03	7,5E-03	5,9E-03
$a_{0,T}$	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,2E-03
T	1,1E-03	1,6E-03	3,6E-03	2,4E-03	2,3E-03	-7,1E-04	-1,8E-03	-1,9E-03
Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)								
$M_{f,1ref}$	4,6E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	2,2E-02	2,4E-02
Contribuição Para a Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)								
$M_{f,1ref}$	4,6E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	4,5E-02	2,2E-02	2,4E-02
Pol	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,5E-03
Jan	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
$Diaf$	1,8E-02	2,6E-02	3,8E-02	4,6E-02	4,7E-02	4,8E-02	5,0E-02	5,0E-02
$Desv$	-3,6E-02	-3,6E-02	-2,5E-02	-4,5E-02	-4,8E-02	-6,2E-02	-7,4E-02	-7,5E-02
$Arred_2$	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03	2,9E-03
$Repet$	4,3E-03	6,8E-03	7,6E-03	1,1E-02	1,4E-02	1,9E-02	2,2E-02	2,3E-02
Incerteza Padrão Combinada (dB re. 1 V/Pa)								
$M_{f,1,ref,corr}$	6,1E-02	6,4E-02	6,5E-02	7,9E-02	8,2E-02	9,3E-02	9,4E-02	9,6E-02
Incerteza Expandida (dB re. 1 V/Pa)								
$M_{f,1,ref,corr}$	0,12	0,13	0,13	0,16	0,16	0,19	0,19	0,19

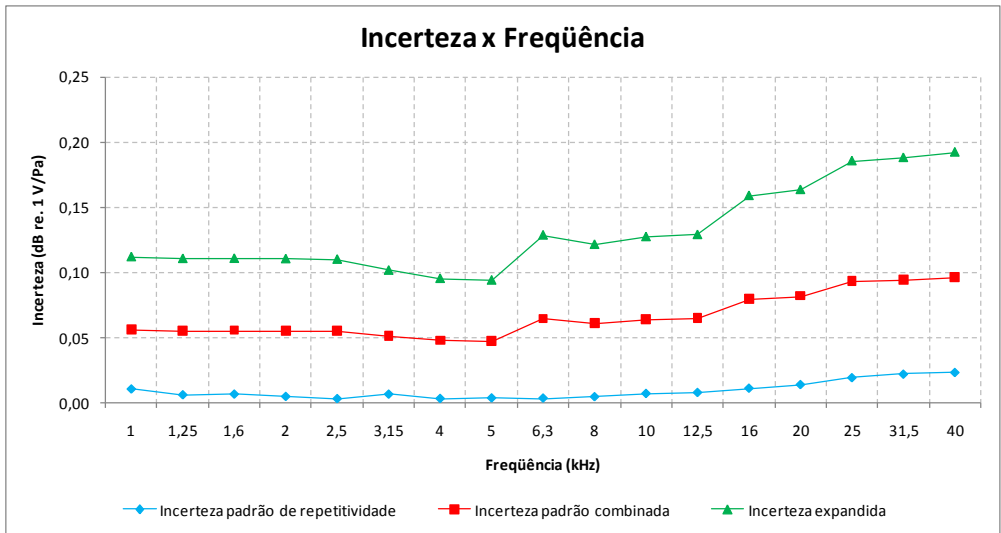


Figura 5.1- Comparação entre as incertezas: padrão de repetitividade, padrão combinada e expandida.

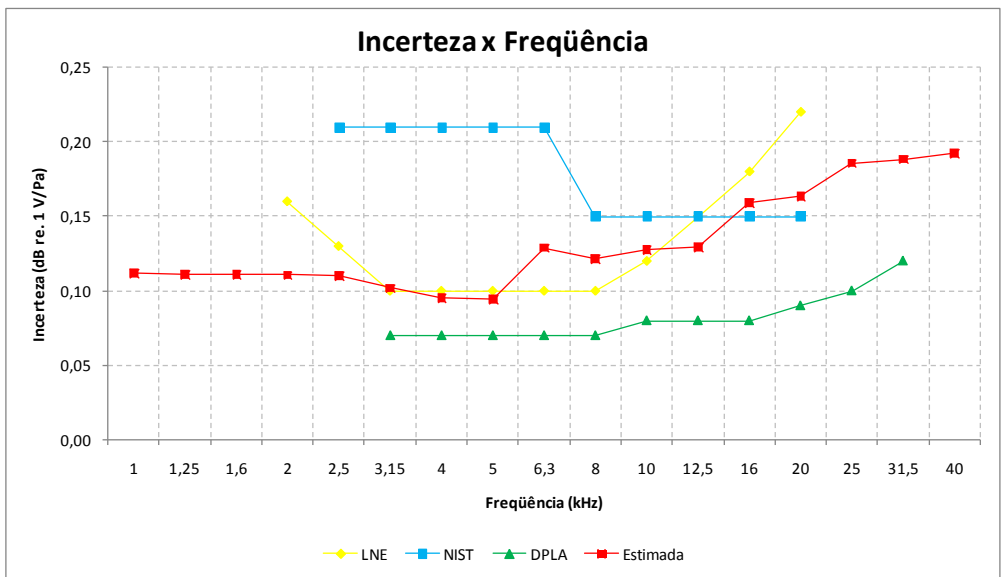


Figura 5.2 – Comparação entre as incertezas expandidas estimadas: neste trabalho, pelo LNE, pelo NIST e pelo DPLA.

Tabela 5.5 – Comparação entre as incertezas expandidas estimadas: neste trabalho, pelo LNE, pelo NIST e pelo DPLA [34].

Frequência (kHz)	Incerteza expandida (dB)			
	LNE	NIST	DPLA	Técnica Proposta
1				0,11
1,25				0,11
1,6				0,11
2	0,16			0,11
2,5	0,13	0,21		0,11
3,15	0,10	0,21	0,07	0,10
4	0,10	0,21	0,07	0,10
5	0,10	0,21	0,07	0,09
6,3	0,10	0,21	0,07	0,13
8	0,10	0,15	0,07	0,12
10	0,12	0,15	0,08	0,13
12,5	0,15	0,15	0,08	0,13
16	0,18	0,15	0,08	0,16
20	0,22	0,15	0,09	0,16
25			0,10	0,19
31,5			0,12	0,19
40				0,19

CAPÍTULO 6

VALIDAÇÃO

6.1 Introdução

Segundo a norma NBR ISO/IEC 17025 [35] validação é a confirmação, por exame e fornecimento de evidência objetiva, de que os requisitos específicos para um determinado uso pretendido são atendidos.

O procedimento adotado neste trabalho para a validação do método proposto segue a ABNT ISO/IEC Guia 43-1 [36], conhecido como Guia 43-1. O Guia 43-1 apresenta, como uma das formas para se atestar a eficiência de um método ou procedimento de medição, o módulo do erro normalizado, $|E_n|$, que é obtido por:

$$|E_n| = \left| \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \right| \quad (6.1)$$

onde X_{lab} e U_{lab} são, respectivamente, o resultado e a incerteza obtidos seguindo o método ou procedimento de medição proposto; X_{ref} e U_{ref} são, respectivamente, o resultado e a incerteza obtidos seguindo o método ou procedimento de medição de referência.

Quando o $|E_n| \leq 1$ considera-se que o método ou procedimento proposto está validado em relação ao método ou procedimento de referência, quando $|E_n| > 1$ considera-se que o método ou procedimento proposto não está validado.

Para este trabalho foi assumido como técnica de referência a técnica utilizada pelo DPLA, instituto nacional de metrologia da Dinamarca. Para isso, foi adquirida junto ao DPLA a calibração de um microfone LS2 por reciprocidade em campo livre que forneceu os resultados e as incertezas de referência.

A escolha pelo DPLA foi feita considerando a tradição desse instituto na área de acústica, bem como seu histórico. O DPLA participou das intercomparações laboratoriais CCAUV.A-K1 e CCAUV.A-K3 sempre com bons resultados, sendo o laboratório piloto da CCAUV.A-K3, [34], além disso, é o laboratório piloto da

intercomparação CCAUV.A-K4 [5], a primeira no âmbito do CCAUV que visa verificar o método de calibração por reciprocidade em campo livre.

6.2 Resultados

O DPLA declarou a sensibilidade em dB re. 1 V/Pa para as condições ambientais de referência e para a faixa de 1,2 kHz a 31,8 kHz em passos de 120 Hz [37]. Como a sensibilidade declarada pelo DPLA foi apresentada para frequências a partir de 1,2 kHz em passos de 120 Hz, para encontrar as sensibilidades em passos de terço de oitava foi necessário interpolar. As sensibilidades obtidas, a partir da interpolação, para as frequências centrais das bandas de terço de oitava foram assumidas como as sensibilidades de referência.

A opção por apresentar a sensibilidade em passos terço de oitava foi feita porque a IEC 61094-3 [4] somente apresenta valores para a posição do centro acústico para a faixa de 1 kHz a 20 kHz em passos de terço de oitava, enquanto que as demais referências pesquisadas, quando apresentam valores para a posição do centro acústico, o fazem em passos de 1 kHz [22] ou 500 Hz [21].

A incerteza expandida de medição apresentada pelo DPLA foi declarada como sendo igual ao produto da incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% [37].

A sensibilidade calculada pela técnica proposta e a sensibilidade de referência são apresentadas na Tabela 6.1.

O módulo do erro normalizado para a sensibilidade calculada pela técnica proposta é apresentado na Tabela 6.2 e na Figura 6.1. Observa-se que o critério para a validação da técnica proposta é atendido para todos os terços de oitava e, dessa forma, considera-se que técnica proposta está validada em relação à técnica utilizada pelo DPLA.

Tabela 6.1 – Sensibilidades.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)			
	Técnica Proposta		Técnica de Referência	
	Módulo	Incerteza	Módulo	Incerteza
1	- 37,83	0,11	-	-
1,25	- 37,80	0,11	- 37,80	0,07
1,6	- 37,74	0,11	- 37,73	0,07
2	- 37,62	0,11	- 37,63	0,07
2,5	- 37,44	0,11	- 37,45	0,07
3,15	- 37,19	0,10	- 37,20	0,07
4	- 36,79	0,10	- 36,75	0,07
5	- 36,16	0,09	- 36,16	0,07
6,3	- 35,21	0,13	- 35,19	0,07
8	- 33,83	0,12	- 33,80	0,07
10	- 32,13	0,13	- 32,07	0,07
12,5	- 30,28	0,13	- 30,24	0,08
16	- 29,00	0,16	- 28,96	0,08
20	- 29,89	0,16	- 29,87	0,09
25	- 32,92	0,19	- 32,94	0,10
31,5	- 37,45	0,19	- 37,46	0,12
40	- 43,82	0,19	-	-

Tabela 6.2 – Módulo do erro normalizado.

Frequência (kHz)	Módulo do Erro Normalizado
1	-
1,25	0,02
1,6	0,10
2	0,08
2,5	0,08
3,15	0,10
4	0,32
5	0,00
6,3	0,20
8	0,23
10	0,48
12,5	0,24
16	0,23
20	0,15
25	0,10
31,5	0,01
40	-

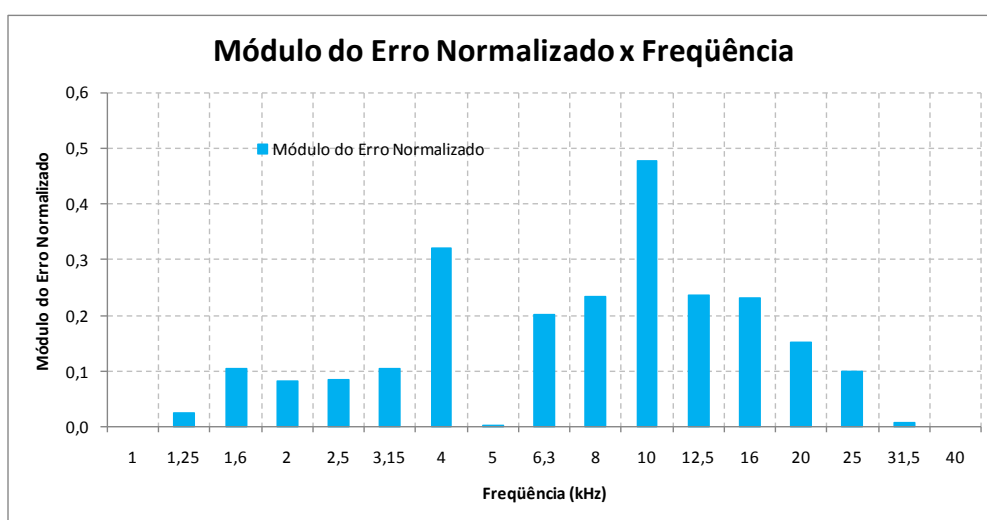


Figura 6.1 – Módulo do erro normalizado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A técnica de medição proposta neste trabalho alcançou o seu objetivo de identificar e remover as imperfeições na determinação da impedância de transferência elétrica para a calibração de microfones de meia polegada por reciprocidade em campo livre.

Segundo RASMUSSEN [25], se o nível do sinal de saída do microfone receptor tem de ser determinado com uma exatidão de 0,01 dB, o nível da diafonia e o nível das reflexões devem estar 60 dB abaixo do nível do sinal de saída do microfone receptor. Com a técnica proposta foi possível determinar o som direto com uma exatidão de 0,01 dB em medições onde a diafonia esteve 32 dB abaixo (do som direto) e as reflexões estiveram 51 dB abaixo do som direto (Figuras 4.23 a 4.26).

As diversas medições da resposta impulsiva obtida com o microfone receptor mostraram que a diafonia permanece constante, apontando que ela é invariante no tempo para o sistema de medição utilizado (Figuras 4.23 a 4.26). As medições da diafonia utilizando o adaptador que simula um microfone, para a aplicação da técnica da subtração, mostraram que a diafonia está 50 dB acima dos demais ruídos elétricos (Figura 4.15) e que sua amplitude aumenta com o aumento da frequência (Figura 4.16).

A descontinuidade entre o pré-amplificador que sustenta o microfone receptor e a sua respectiva haste de sustentação foi reduzida com a utilização de fita adesiva (solução proposta por BARRERA-FIGUEROA [15]). A técnica proposta neste trabalho, entretanto, permite a redução do efeito desta descontinuidade na resposta impulsiva obtida com o microfone receptor por meio da aplicação de uma função janela.

A boa concordância entre as sensibilidades determinadas a diferentes distâncias entre os microfones (Figura 4.31) permite que as medições sejam realizadas em uma única distância. Esta técnica permite ainda que a faixa de frequência medida seja estendida para frequências mais baixas.

A incerteza estimada neste trabalho é da mesma ordem de grandeza das estimadas pelos INMs que oferecem este serviço de calibração.

A técnica proposta neste trabalho mostrou-se suficientemente robusta, tendo sido adotada pelo Inmetro como parte do sistema primário de calibração de microfones em campo livre. Em janeiro de 2008 tomou parte da intercomparação laboratorial CCAUV.A-K4 sendo que a minuta do relatório desta intercomparação é esperada para junho de 2009.

7.2 Propostas para Trabalhos Futuros

Para este trabalho foram utilizados os centros acústicos apresentados pela IEC 61094-3 [10] para a faixa de frequência de 1 kHz a 20 kHz e os apresentados por BARRERA-FIGUEROA *et al* [22] para as frequências de 25 kHz, 31,5 kHz e 40 kHz. No Capítulo 3, entretanto, são apresentados alguns procedimentos para a medição do centro acústico que podem ser explorados em trabalhos futuros. O domínio da medição do centro acústico permitirá que microfones WS2 sejam calibrados utilizando a técnica proposta. Com isto, será possível determinar as correções para se obter os níveis de sensibilidade em campo livre a partir da calibração por atuador eletrostático de microfones WS2.

A calibração por reciprocidade em campo livre de microfones LS1 é uma seqüência natural deste trabalho uma vez que o BIPM determina que a unidade do sistema internacional na área de acústica é reproduzida na calibração de microfones LS1 e LS2. Além disso, a técnica proposta torna-se mais simples de ser implementada, pois a relação sinal-ruído deverá ser incrementada em 12 dB. Deverá ser criado um novo sinal de excitação iniciando na frequência de 500 Hz e se estendendo até 25 kHz.

SOARES [12] apresenta um novo método de calibração por comparação em campo livre no qual ele acopla acusticamente os microfones por meio de um ambiente qualquer, porém, utiliza a resposta impulsiva em conjunto com a aplicação de uma função janela para determinar a sensibilidade em campo livre (calibração por comparação seqüencial em campo livre simulado). Assim, é normal se questionar se não é possível fazer o mesmo para a calibração por reciprocidade em campo livre. Se possível, isto diminuirá o custo da implementação desta calibração.

As propostas mais audaciosas são: incluir a fase da sensibilidade na calibração por reciprocidade, o que já tem sido objeto de estudo de alguns INMs, e implementar a calibração por reciprocidade em campo difuso que, ainda que envolva muitas dificuldades [10], já começa a ser discutida por alguns INMs.

APÊNDICE A

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DA DENSIDADE DO AR

Neste apêndice é apresentado o procedimento para o cálculo da densidade do ar segundo DAVIS [18], que é utilizada na determinação da impedância de transferência acústica (item 3.3).

Lista de Símbolos:

a_n	Coefficientes utilizados no cálculo da pressão de saturação do vapor d'água (p_{sv}), do fator de intensificação ($f(p_s, t_c)$) e do fator de compressibilidade (Z);
$f(p_s, t_c)$	Fator de intensificação;
H	Umidade relativa, %;
p_s	Pressão estática nas condições de medição, Pa;
p_{sv}	Pressão de saturação do vapor d'água, Pa;
$p_{s,r}$	= 101 325 Pa, pressão estática nas condições de referência;
T	Temperatura termodinâmica nas condições de medição, K;
T_0	= 273,15 K;
T_{20}	= 293,15 K;
t_c	Temperatura Celsius, °C;
x_c	Fração molar do vapor de dióxido de carbono no ar;
x_w	Fração molar do vapor d'água no ar;
Z	Fator de compressibilidade;
ρ	Densidade do ar, kg/m ³ .

Procedimento de Cálculo:

Passo 1

Determine a pressão de saturação do vapor d'água de acordo com:

$$p_{sv} = \exp(a_0 T^2 + a_1 T + a_2 + a_3 T^{-1}) \quad (\text{A.1})$$

Passo 2

Determine o fator de intensificação de acordo com:

$$f(p_s, t_c) = a_0 + a_1 p_s + a_2 t_c^2 \quad (\text{A.2})$$

Passo 3

Determine a fração molar do vapor d'água no ar de acordo com:

$$x_w = \frac{H}{100} \frac{p_{sv}}{p_s} f(p_s, t_c) \quad (\text{A.3})$$

Passo 4

Determine o fator de compressibilidade de acordo com:

$$Z = 1 - \frac{p_s}{T} [a_0 + a_1 t_c + a_2 t_c^2 + (a_3 + a_4 t_c) x_w + (a_5 + a_6 t_c) x_w^2] + \left(\frac{p_s}{T}\right)^2 (a_7 + a_8 x_w^2) \quad (\text{A.4})$$

Passo 5

A fração molar do dióxido de carbono no ar:

A composição do ar padrão é baseada numa fração molar de dióxido de carbono de 0,000 314. Entretanto, é consenso que, sob condições de laboratório, este valor é um pouco mais alto. Na ausência de medições efetivas é recomendado o valor $x_c = 0,000 4$.

Passo 6

Determine a densidade do ar de acordo com:

$$\rho = [3,483 49 + 1,44(x_c - 0,000 4)] \cdot 10^{-3} \frac{p_s}{ZT} (1 - 0,378 0 x_w) \quad (\text{A.5})$$

A Tabela A.1 apresenta os coeficientes utilizados nas equações acima.

Tabela A.1 – Coeficientes utilizados nas Equações (A.1), (A.2) e (A.4).

Coeficientes	Pressão de saturação do vapor d'água (p_{sv})	Fator de intensificação ($f(p_s, t_c)$)	Fator de compressibilidade (Z)
a_0	$1,237\ 884\ 7 \cdot 10^{-5}$	1,000 62	$1,581\ 23 \cdot 10^{-6}$
a_1	$-1,912\ 131\ 6 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$	$-2,933\ 1 \cdot 10^{-8}$
a_2	33,937 110 47	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$1,104\ 3 \cdot 10^{-10}$
a_3	$-6,343\ 164\ 5 \cdot 10^3$		$5,707 \cdot 10^{-6}$
a_4			$-2,051 \cdot 10^{-8}$
a_5			$1,989\ 8 \cdot 10^{-4}$
a_6			$-2,376 \cdot 10^{-6}$
a_7			$1,83 \cdot 10^{-11}$
a_8			$-0,765 \cdot 10^{-8}$

A incerteza relativa da equação para densidade do ar é estimada em 10^{-4} e as equações utilizadas para os cálculos são válidas para variações dentro das seguintes faixas para as condições ambientais [17]:

Temperatura: 15 °C até 27 °C
 Pressão estática: 60 kPa até 110 kPa
 Umidade relativa: 10% até 90%

A Tabela A.2 apresenta alguns valores para a densidade do ar sob determinadas condições ambientais.

Tabela A.2 – Valores para a densidade do ar [17].

Condições ambientais	Densidade do ar (kg/m^3)
$t_c = 23\text{ °C}$, $p_s = 101\ 325\ \text{Pa}$, $H = 50\%$	1,186 0
$t_c = 20\text{ °C}$, $p_s = 80\ 000\ \text{Pa}$, $H = 65\%$	0,944 1

APÊNDICE B

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DO SOM PELO AR

Neste apêndice é apresentado o procedimento para o cálculo do coeficiente de absorção do som pelo ar segundo a norma internacional ISO 9631-1 [19]. Esse coeficiente é utilizado na determinação da impedância de transferência acústica (item 3.3).

Lista de Símbolos:

f	Frequência de excitação, Hz;
f_{rN}	Frequência de relaxamento do Nitrogênio, Hz;
f_{rO}	Frequência de relaxamento do Oxigênio, Hz;
H	Umidade relativa, %;
h	Fração da concentração molar do vapor d'água;
p_m	Pressão de saturação do vapor d'água, kPa;
p_s	Pressão estática nas condições de medição, kPa;
$p_{s,r}$	= 101,325 kPa, pressão estática nas condições de referência [19];
T	Temperatura termodinâmica nas condições de medição, K;
T_{01}	= 273,16 K;
T_{20}	= 293,15 K;
α	Coefficiente de absorção do som pelo ar, Np/m.

Procedimento de Cálculo:

Passo 1

Determine a pressão de saturação do vapor d'água de acordo com:

$$\frac{p_m}{p_{s,r}} = 10^D \quad (\text{B.1})$$

onde

$$D = 4,615 \cdot 10^{-6} - 6,834 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} \quad (\text{B.2})$$

Passo 2

Determine a fração da concentração molar do vapor d'água de acordo com:

$$h = \frac{H}{100} \left(\frac{p_m}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{p_{s,r}}{p_s} \right) \quad (\text{B.3})$$

Passo 3

Determine as frequências de relaxamento de acordo com:

$$f_{rO} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left[24 + 4,04 \cdot 10^6 h \left(\frac{0,2 + 10^3 h}{3,91 + 10^3 h} \right) \right] \quad (\text{B.4})$$

$$f_{rN} = \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[9 + 28 \cdot 10^3 h \exp \left(-4,170 \left(\left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{3}} - 1 \right) \right) \right] \quad (\text{B.5})$$

Passo 4

Determine o coeficiente de absorção do som pelo ar de acordo com:

$$\alpha = f^2 \left[18,4 \cdot 10^{-12} \left(\frac{p_s}{p_{s,r}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{5}{2}} \left(0,012 \cdot 75 \frac{\exp(-2239,1/T)}{f_{rO} + (f^2/f_{rO})} + 0,106 \cdot 8 \frac{\exp(-3352,0/T)}{f_{rN} + (f^2/f_{rN})} \right) \right] \quad (\text{B.6})$$

A exatidão deste cálculo é estimada em $\pm 10\%$ para variações dentro das seguintes faixas para as condições ambientais [4]:

Temperatura:	-20 °C até 50 °C
Pressão estática:	menor que 200 kPa
Concentração molar do vapor d'água:	$0,5 \cdot 10^{-3}$ até $50 \cdot 10^{-3}$
Taxa frequência-pressão:	0,4 Hz/kPa até 10^4 Hz/kPa

A Tabela B.1 apresenta alguns valores para o coeficiente de absorção do som pelo ar em função da frequência sob condições ambientais de referência.

Tabela B.1 – Valores para o coeficiente de absorção do som no ar [4].

Condições ambientais: temperatura: 23,0 °C, pressão estática: 101,325 kPa, umidade: 50%.	
Frequência (kHz)	α (Np/m)
1,0	0,000 601
1,25	0,000 716
1,6	0,000 897
2,0	0,001 144
2,5	0,001 519
3,15	0,002 123
4,0	0,003 115
5,0	0,004 570
6,3	0,006 919
8,0	0,010 739
10,0	0,016 249
12,5	0,024 529
16,0	0,038 309
20,0	0,056 424
25,0	0,081 288
31,5	0,115 099
40,0	0,158 817

APÊNDICE C

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

As Tabelas C.1, C.2, C.3, C.4 e C.5 apresentam cada uma das cinco medições para o microfone número de série 2564045 utilizando a técnica proposta. A sensibilidade foi calculada para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm, sendo também calculada a sensibilidade média correspondente. Para o estudo da repetitividade do resultado das medições, o procedimento acima foi repetido quatro vezes e a sensibilidade declarada foi a média entre as sensibilidades médias, apresentada no subitem 4.3.5.

Tabela C.1 – Primeira medição para o microfone nº de série 2564045.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)				
	17 cm	20 cm	24 cm	30 cm	Média
1	-37,93	-37,82	-37,70	-37,75	-37,80
1,25	-37,81	-37,75	-37,80	-37,79	-37,79
1,6	-37,74	-37,77	-37,77	-37,67	-37,74
2	-37,64	-37,66	-37,57	-37,59	-37,62
2,5	-37,44	-37,42	-37,41	-37,45	-37,43
3,15	-37,20	-37,17	-37,19	-37,18	-37,18
4	-36,80	-36,79	-36,78	-36,80	-36,79
5	-36,18	-36,18	-36,14	-36,18	-36,17
6,3	-35,23	-35,22	-35,21	-35,22	-35,22
8	-33,87	-33,84	-33,82	-33,84	-33,84
10	-32,19	-32,14	-32,13	-32,13	-32,15
12,5	-30,36	-30,27	-30,28	-30,27	-30,30
16	-29,11	-29,00	-29,01	-28,99	-29,03
20	-30,03	-29,89	-29,93	-29,91	-29,94
25	-33,09	-32,92	-32,97	-32,95	-32,98
31,5	-37,67	-37,45	-37,52	-37,48	-37,53
40	-44,09	-43,82	-43,91	-43,83	-43,91

Tabela C.2 – Segunda medição para o microfone nº de série 2564045.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)				
	17 cm	20 cm	24 cm	30 cm	Média
1	-37,73	-37,84	-37,78	-37,92	-37,82
1,25	-37,77	-37,78	-37,80	-37,79	-37,79
1,6	-37,71	-37,77	-37,73	-37,72	-37,73
2	-37,58	-37,60	-37,62	-37,64	-37,61
2,5	-37,43	-37,45	-37,44	-37,42	-37,43
3,15	-37,17	-37,20	-37,18	-37,19	-37,18
4	-36,78	-36,79	-36,77	-36,78	-36,78
5	-36,16	-36,16	-36,15	-36,15	-36,15
6,3	-35,22	-35,20	-35,20	-35,21	-35,21
8	-33,86	-33,82	-33,82	-33,82	-33,83
10	-32,18	-32,11	-32,11	-32,12	-32,13
12,5	-30,34	-30,25	-30,24	-30,24	-30,27
16	-29,09	-28,97	-28,97	-28,97	-29,00
20	-30,01	-29,85	-29,86	-29,87	-29,90
25	-33,07	-32,88	-32,88	-32,91	-32,84
31,5	-37,66	-37,40	-37,41	-37,44	-37,48
40	-44,09	-43,77	-43,76	-43,80	-43,85

Tabela C.3 – Terceira medição para o microfone nº de série 2564045.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)				
	17 cm	20 cm	24 cm	30 cm	Média
1	-37,88	-37,90	-37,89	-37,84	-37,88
1,25	-37,81	-37,82	-37,83	-37,84	-37,82
1,6	-37,74	-37,74	-37,72	-37,76	-37,74
2	-37,67	-37,62	-37,64	-37,62	-37,64
2,5	-37,47	-37,45	-37,46	-37,43	-37,45
3,15	-37,23	-37,18	-37,18	-37,21	-37,20
4	-36,82	-36,78	-36,81	-36,77	-36,79
5	-36,21	-36,16	-36,17	-36,16	-36,17
6,3	-35,28	-35,21	-35,24	-35,23	-35,24
8	-33,91	-33,83	-33,86	-33,83	-33,86
10	-32,23	-32,13	-32,14	-32,15	-32,16
12,5	-30,41	-30,26	-30,29	-30,29	-30,31
16	-29,16	-28,97	-29,02	-29,02	-29,04
20	-30,09	-29,84	-29,91	-29,92	-29,94
25	-33,17	-32,84	-32,94	-32,95	-32,97
31,5	-37,75	-37,35	-37,47	-37,48	-37,51
40	-44,18	-43,71	-43,84	-43,85	-43,89

Tabela C.4 – Quarta medição para o microfone nº de série 2564045.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)				
	17 cm	20 cm	24 cm	30 cm	Média
1	-37,84	-37,84	-37,82	-37,77	-37,82
1,25	-37,76	-37,81	-37,79	-37,71	-37,77
1,6	-37,78	-37,72	-37,71	-37,77	-37,74
2	-37,63	-37,62	-37,61	-37,59	-37,61
2,5	-37,44	-37,44	-37,44	-37,46	-37,44
3,15	-37,19	-37,18	-37,18	-37,19	-37,18
4	-36,79	-36,79	-36,78	-36,79	-36,79
5	-36,16	-36,15	-36,15	-36,15	-36,15
6,3	-35,21	-35,21	-35,20	-35,19	-35,20
8	-33,83	-33,82	-33,82	-33,80	-33,82
10	-32,12	-32,13	-32,12	-32,11	-32,12
12,5	-30,25	-30,26	-30,26	-30,24	-30,25
16	-28,97	-28,97	-28,97	-28,96	-28,97
20	-29,85	-29,84	-29,84	-29,84	-29,8
25	-32,87	-32,84	-32,85	-32,84	-32,85
31,5	-37,39	-37,35	-37,36	-37,36	-37,37
40	-43,77	-43,72	-43,71	-43,71	-43,73

Tabela C.5 – Quinta medição para o microfone nº de série 2564045.

Frequência (kHz)	Sensibilidade (dB re. 1 V/Pa)				
	17 cm	20 cm	24 cm	30 cm	Média
1	-37,85	-37,76	-37,83	-37,92	-37,84
1,25	-37,78	-37,77	-37,83	-37,89	-37,82
1,6	-37,72	-37,75	-37,76	-37,72	-37,74
2	-37,64	-37,62	-37,61	-37,63	-37,63
2,5	-37,45	-37,41	-37,44	-37,45	-37,44
3,15	-37,20	-37,18	-37,18	-37,16	-37,18
4	-36,80	-36,79	-36,77	-36,77	-36,78
5	-36,18	-36,14	-36,14	-36,15	-36,15
6,3	-35,22	-35,20	-35,20	-35,20	-35,20
8	-33,83	-33,81	-33,81	-33,81	-33,82
10	-32,13	-32,10	-32,11	-32,10	-32,11
12,5	-30,27	-30,25	-30,25	-30,24	-30,25
16	-28,98	-28,96	-28,97	-28,96	-28,97
20	-29,87	-29,83	-29,84	-29,85	-29,85
25	-32,89	-32,83	-32,84	-32,86	-32,86
31,5	-37,42	-37,35	-37,37	-37,38	-37,38
40	-43,79	-43,70	-43,72	-43,73	-43,74

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 61094-2: *Measurement Microphones – Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*, 1 ed., 1992.
- [2] HENRÍQUEZ, V., RASMUSSEN, K., *Final Report on the Key Comparison CCAUV.A-K3*, Centro Nacional de Metrología, México, Danish Primary Laboratory for Acoustics, Dinamarca, 2006.
- [3] HENRÍQUEZ, V., RASMUSSEN, K., *Report on the Key Comparison CCAUV.A-K3, Draft B*, Centro Nacional de Metrología, México, Danish Primary Laboratory for Acoustics, Dinamarca, 2006.
- [4] IEC 61094-3: *Measurement Microphones – Part 3: Primary Method for Free-field Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*, 1 ed., 1995.
- [5] RASMUSSEN, K., BARRERA-FIGUEROA, S., *Technical Protocol for Key Comparison CCAUV.A-K4, Draft*, Centro Nacional de Metrología, México, Danish Primary Laboratory for Acoustics, Dinamarca, 2006.
- [6] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia*, 5 ed., Rio de Janeiro, SENAI, 2007.
- [7] IEC 61094-5: *Measurement Microphones – Part 5: Methods for Pressure Calibration of Working Standard Microphones by Comparison*, 1 ed., 2001.
- [8] SOARES, Z., “Curso de Microfones Capacitivos de Medição”, *Inmetro*, 2002.
- [9] IEC 61094-6: *Measurement Microphones – Part 6: Electrostatic Actuators for Determination of Frequency Response*, 1 ed., 2004.

- [10] FREDERIKSEN, E., “Primary and Secondary Microphone Calibration and Associated Uncertainties”, *NCSL Workshop & Symposium*, 1999.
- [11] WONG, G., EMBLETON T., *AIP Handbook of Condenser Microphones: Theory, Calibration, and Measurements*, *AIP Series in Modern Acoustics and Signal Processing*, Nova Iorque, AIP Press – American Institute of Physics, 1995.
- [12] SOARES, Z., *Calibração de Microfones com Resposta Impulsiva*, Tese de Dr. Eng., Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.
- [13] *IEC 61183: Electroacoustics – Random-incidence and Diffuse-field Calibration of Sound Level Meters*, 1 ed., 1994.
- [14] *IEC 61094-8: Measurement Microphones – Part 8: Methods for Free-field Calibration of Working Standard Microphones by Comparison*, Potential Work Item (PWI), 2006.
- [15] BARRERA-FIGUEROA, S., *New Methods for Transducer Calibration: Free-field Reciprocity Calibration of Condenser Microphones*, PhD Thesis, Acoustic Technology, Technical University of Denmark, Lyngby, Dinamarca, 2003.
- [16] RASMUSSEN, K., *The Influence of Environmental Conditions on the Pressure Sensitivity of Measurement Microphones*, In: Brüel & Kjaer Technical Review, n. 1, pp. 1-13, 2001.
- [17] 29/WG5/WD8-07/06: *IEC 61094-2: Measurement Microphones – Part 2: Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*, Committee Draft for Voting, 2007.
- [18] DAVIS, R., “Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91)”, *Metrologia*, v. 29, n. 1, pp.67-70, 1992.

[19] *ISO 9613-1: Acoustics – Attenuation of Sound During Propagation Outdoors – Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere*, 1 ed., 1993.

[20] JACOBSEN, F., BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., “A Note on the Concept of Acoustic Center”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 115, n. 4, pp. 1468-1473, Abr. 2004.

[21] WAGNER R., NEDZELNITSKY, V., “Determination of Acoustic Center Correction Values for Type LS2aP Microphones at Normal Incidence”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 1, pp. 192-203, Jul. 1998.

[22] BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., JACOBSEN, F., “The Acoustic Center of Laboratory Standard Microphones”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 120, n. 5, pp. 2668-2675, Nov. 2006.

[23] HRUSKA, G., KOIDAN, W., “Free-field Method for Sound-attenuation Measurement”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, n. 2, pp. 507-509, Ago. 1975.

[24] VORLÄNDER M., BIETZ, H., “Novel Broad-band Reciprocity Technique for Simultaneous Free-field and Diffuse-field Microphone Calibration”, *Acustica*, v. 80, pp. 365-377, 1994.

[25] RASMUSSEN, K., “A Note on Free-field Reciprocity Calibration”, *DPLA Calibration Workshop*, 2003.

[26] *Product Data: Condenser Microphone Cartridges – Types 4160 and 4180*, Brüel & Kjaer.

[27] *Product Data: FalconTM Range ½” Microphone Preamplifier – Type 2673*, Brüel & Kjaer.

[28] ABNT/Comitê Brasileiro de Eletricidade, *Dicionário Brasileiro de Eletricidade (Conforme Normas Técnicas Brasileiras)*, 1 ed., Rio de Janeiro, ABNT, 1987.

- [29] BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., JACOBSEN, F., “On the Interference Between the Two Microphones in Free-field Reciprocity Calibration”, *Journal of the Acoustical Society of America*, v. 116, n. 5, pp. 2771-2778, Nov. 2004.
- [30] MÜLLER, S., MASSARANI, P., “Transfer-Function Measurement with Sweeps”, *Journal of Audio Engineering Society*, v.49, n. 6, pp. 443-471, Jun. 2001.
- [31] INMETRO, ABNT, SBM, *Expressão da Incerteza de Medição na Calibração*, 1 ed., Rio de Janeiro, Inmetro, 1999.
- [32] ABNT, INMETRO, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 3 ed., Rio de Janeiro, Inmetro, 2003.
- [33] GRAMTORP, J., FREDERIKSEN, E., *Frequency Response for Measurement Microphones – A Question of Confidence*, In: Brüel & Kjaer Technical Review, n. 1, pp. 24-35, 2001.
- [34] BIPM, *Calibration and Measurement Capabilities – CMCs*. Disponível em: <<http://www.bipm.org>>. Acesso em: fev. 2008.
- [35] *NBR ISO/IEC 17025: Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração*, 2 ed., 2005.
- [36] *ABNT ISO/IEC GUIA 43-1: Ensaaios de Proficiência por Comparações Interlaboratoriais – Parte 1: Desenvolvimentos e Operação de Programas de Ensaaios de Proficiência*, 1 ed., 1999.
- [37] DFM, *Certificate nr. A0701: Calibration Certificate – Free-field Microphone Sensitivity, Identification: Laboratory Standard Microphone Type 4180 S/N 2564045*, 2007.