Produto & Produção, vol. 11, n. 1, p. 56 - 69, fev. 2010
Edição Metrologia

Técnica para Calibração Primária em Campo Livre de Microfones de Medição

Thiago Antônio B. Milhomem, M.Sc.
Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro
tbmilhomem@oi.com.br

Zemar M. Defilippo Soares, Dr.Eng.
Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro
zmsoares@inmetro.gov.br

Ricardo E. Musafir, D.Sc.
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade
Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
rem@mecanica.ufrj.br

RESUMO

Este artigo apresenta a técnica de medição, desenvolvida e implementada no Inmetro, para a calibração primária em campo livre de microfones de medição. Nesta técnica, a diafonia (crosstalk) é removida por subtração e o interespalhamento (multiple backscattering) e as demais reflexões são removidos por um procedimento de seleção no tempo.

Palavras-chave: calibração primária, campo livre, microfones de medição.

1 INTRODUÇÃO

A calibração primária de microfones de medição 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 e a corrente elétricas nos terminais dos microfones).

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 cria uma série de problemas para determiná-la, como a diafonia (crosstalk), o interespalhamento (multiple backscattering) [1] e as reflexões nas paredes da câmara anecoica e nos suportes mecânicos.

A técnica clássica para a determinação da impedância de transferência elétrica não permite remover estas imperfeições, o que resulta em efeitos nocivos para a resposta em frequência do microfone. Já a técnica proposta por Barrera-Figueroa [2] consegue removê-las, mas o processamento de sinal utilizado causa efeitos nocivos para a resposta em frequência do microfone que são, entretanto, menores que os resultantes da técnica clássica.

Este artigo apresenta a técnica de medição, desenvolvida e implementada no Inmetro, que permite remover a diafonia, o interespalhamento e as demais reflexões na determinação da impedância de transferência elétrica causando efeitos nocivos menores que os causados pela técnica proposta por Barrera-Figueroa, que é considerada, atualmente, o estado da arte.

2 CALIBRAÇÃO DE MICROFONES

A calibração de um microfone de medição 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.

Existem duas classes hierárquicas de calibração: a calibração secundária e a primária. Na calibração secundária determina-se a sensibilidade de um microfone a partir de padrões de mesma unidade do microfone como, por exemplo, a partir de um microfone padrão ou de uma fonte sonora padrão. Já, na calibração primária, determina-se a sensibilidade de um microfone a partir da combinação de padrões de unidades diferentes do microfone como, por exemplo, a partir de padrões de tensão e corrente elétricas, de comprimento, de temperatura, de umidade relativa e de pressão estática.

Na prática, as medições acústicas são realizadas em diferentes tipos de campos sonoros. Nas baixas frequências 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 características similares às do campo onde o microfone será utilizado.

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 do campo sonoro. 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. No campo livre, a propagação acontece sem a interferência de qualquer objeto; aproximações da condição de campo livre podem ser encontradas em câmaras anecoicas.

3 CALIBRAÇÃO PRIMÁRIA EM CAMPO LIVRE

A calibração primária de microfones de medição é realizada utilizando o método da reciprocidade. De acordo com esse método, três microfones são agrupados em pares; em cada par, um microfone atua como fonte sonora e o outro como receptor sonoro. Nessas condições, as sensibilidades dos microfones são determinadas a partir das impedâncias de transferência acústica e de transferência elétrica. A impedância de transferência acústica é determinada a partir das impedâncias dos microfones envolvidos e da impedância característica do meio. A impedância de transferência elétrica é determinada a partir da razão entre a corrente elétrica no microfone fonte e a tensão elétrica no microfone receptor. Entretanto, a medição da corrente no microfone fonte é substituída pela medição da tensão sobre um capacitor colocado em série com o microfone fonte [3]. A Figura 1 apresenta o esquema da calibração primária.

Fig. 1 - Esquema da calibração primária [3].

Apesar do método da reciprocidade permitir a determinação da magnitude e da fase da sensibilidade, até o momento somente a magnitude da sensibilidade é o objeto dos laboratórios que realizam este método [3].

Na calibração primária em campo livre, os microfones são acoplados acusticamente por meio de uma câmara anecoica que cria as condições de campo livre. As distâncias entre eles são pré-determinadas de forma a buscar uma boa relação sinal-ruído, condições de ondas planas e a evitar o fenômeno do interespalhamento. A Figura 2 apresenta um esquema da calibração primária em campo livre.

Fig.2 - Esquema da calibração primária em campo livre, onde x_{12} é a distância entre os diafragmas dos microfones 1 e 2.

3.1 Determinação da Impedância de Transferência Elétrica

Embora a determinação da impedância de transferência elétrica pareça ser um processo simples ela é, na verdade, um processo muito difícil e complicado [4]. A tensão no microfone receptor (da ordem de microvolt) é muito baixa quando comparada com o ruído elétrico do microfone e do pré-amplificador, o que cria uma série de problemas para medi-la como: a diafonia, o interespalhamento e as reflexões nas paredes da câmara anecoica e nos suportes mecânicos. 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. O interespalhamento é uma interferência entre o som direto e o seu espalhamento nas bordas dos microfones [5].

Para a calibração primária, a diafonia, o interespalhamento e as demais reflexões devem estar 60 dB abaixo do nível do sinal de saída do microfone receptor.

3.2 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 3 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

Fig. 3 - Diagrama de blocos da técnica clássica [1].

Com essa técnica é possível perceber os efeitos nocivos da diafonia, do interespalhamento e das demais reflexões sobre a resposta em frequência, mas não é possível identificá-los, muito menos eliminá-los.

A solução adotada é calibrar os microfones utilizando diferentes distâncias entre os microfones e apresentar a média das sensibilidades obtidas (ver Figura 4). Os efeitos nocivos 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.

Fig. 4 - 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.

3.3 Técnica Proposta por Barrera-Figueroa

Na técnica proposta por Barrera-Figueroa [2] 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 [2] propõe a utilização de uma técnica de seleção no tempo para supressão da diafonia, do interespalhamento e das demais reflexões. A Figura 5 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

Fig. 5 - Diagrama de blocos da técnica proposta por Barrera-Figueroa.

Para a utilização da técnica de seleção no tempo, aplica-se uma Transformada (Rápida) Inversa de Fourier (IFFT) à resposta em frequência para se obter a resposta impulsiva. Então, aplica-se 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. Para a supressão da diafonia, do interespalhamento e das demais reflexões, BARRERA-FIGUEROA [2] propõe a aplicação de uma janela Tukey com 2 ms de largura sendo 0,6 ms a largura da parte suavizada.

A maior limitação desta solução é que a janela é muito estreita, fazendo com que haja perda de energia nas frequências mais baixas. Apesar de ser melhor que a técnica clássica, ainda são perceptíveis os efeitos nocivos da diafonia, do interespalhamento e das demais reflexões nas frequências abaixo de 4 kHz. A sensibilidade determinada com essa técnica para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm, juntamente com a sensibilidade média correspondente estão mostradas na Figura 6.

Fig. 6 - 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 [1].

4 TÉCNICA DESENVOLVIDA NO INMETRO

Na técnica desenvolvida no Inmetro 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_t) e também a tensão sobre o microfone receptor (U_r). Em ambos os casos é medida a resposta em frequência, obtida pela multiplicação, no domínio da frequência, da resposta à 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 – chamado de filtro fase máxima. As frequências de corte da banda passante são 850 Hz e 45 kHz. A Figura 7 ilustra o diagrama de blocos dessa técnica.

Fig. 7 - Diagrama de blocos da técnica desenvolvida no Inmetro [1].

A varredura de senos utilizada possui envelope constante na faixa de frequência de 1 kHz a 40 kHz (7,7 V rms), com ênfase na faixa de 1 kHz a 6,3 kHz (obtida com a redução da velocidade da execução do sinal de excitação) e foi construída utilizando o programa Monkey Forest [6].

Seguindo os passos descritos na Figura 7 foram medidas as tensões U_t e U_r no domínio da frequência (Figura 8) e no domínio do tempo (Figura 9).

Fig. 8 - Tensões U_t e U_r no domínio da frequência [1].

Fig. 9 - Tensões U_t e U_r no domínio do tempo [1].

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 interespalhamento 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 a 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 interespalhamento referem-se a reflexões (nas paredes da câmara anecoica), ao ruído de fundo, ao ruído elétrico e às componentes de distorção harmônica.

4.1 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 que simula um microfone mediu-se a diafonia de maneira idêntica à utilizada para a 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 . A Figura 10 ilustra o passo-a-passo deste procedimento.

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 10a e 10c), o que mostra que essas ondulações estão relacionadas com a diafonia.

Fig. 10 - 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 [1].

4.2 Supressão do Inter-Espalhamento e das Demais Reflexões

A solução utilizada foi a aplicação de uma técnica de seleção no tempo 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 11). Desta forma, o pico de energia do interespalhamento não fica sobreposto ao decaimento do som direto e torna-se possível distinguir o som direto (e seu decaimento) do interespalhamento (e seu decaimento). O pico de energia do som direto fica sobreposto à parte final do decaimento do interespalhamento, mas, como a energia do som direto está aproximadamente 70 dB acima, a energia do decaimento do interespalhamento não interfere na medição do som direto.

Fig. 11 - Resposta impulsiva com filtro fase máxima da tensão U_r após a subtração da diafonia [1].

O procedimento adotado para a supressão do interespalhamento 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 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. A Figura 12 ilustra o passo-a-passo desse procedimento. Esta figura mostra que, após a aplicação da janela, a medição da tensão U_r ficou mais “limpa” (Figuras 12a e 12d), o que mostra que a “sujeira” está relacionada com o interespalhamento, as reflexões (nas paredes e nos suportes mecânicos), o ruído de fundo, o ruído elétrico e as componentes de distorção harmônica.

Fig. 12 - Supressão do interespalhamento 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 [1].

4.3 Sistemas 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, uma unidade transmissora, três microfones LS2 e um adaptador (com capacitância de 20 pF) que simula um microfone. A Figura 13 apresenta o sistema de medição.

Fig. 13 - Sistema de medição [1].

5 RESULTADOS

A sensibilidade determinada para as distâncias entre os microfones de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm, juntamente com a sensibilidade média correspondente estão mostradas na Figura 14.

Fig. 14 - Sensibilidades de um mesmo microfone obtidas utilizando a técnica desenvolvida no Inmetro. As distâncias entre os microfones foram de 17 cm, 20 cm, 24 cm e 30 cm [1].

Para o estudo da repetitividade do resultado das medições, o procedimento foi repetido quatro vezes e a sensibilidade declarada foi a média entre elas. Os efeitos nocivos da diafonia, do interespalhamento e das demais reflexões nas frequências abaixo de 4 kHz diminuem em relação à técnica proposta por Berrera-Figueroa.

A Figura 15 mostra as incertezas padrão de repetitividade, padrão combinada e expandida, calculadas seguindo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [7]. 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.

Fig.15 - Comparação entre as incertezas: padrão de repetitividade, padrão combinada e expandida [1].

A Figura 16 compara a incerteza expandida estimada para a técnica desenvolvida no Inmetro 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 para a técnica desenvolvida no Inmetro é da mesma ordem de grandeza das estimadas por esses institutos.

Fig. 16 - Comparação entre as incertezas expandidas estimadas pelo Inmetro, LNE, NIST e DPLA.

6 VALIDAÇÃO

Para a validação da técnica foi utilizado o módulo do erro normalizado, $|En|$ [8]: quando $|En| \leq 1$, considera-se que o método ou procedimento proposto está validado em relação ao método ou procedimento de referência, quando $|En| > 1$ considera-se que o método ou procedimento proposto não está validado.

Foi considerada como técnica de referência a utilizada pelo DPLA, instituto nacional de metrologia da Dinamarca. Para isso, foi adquirida, junto ao DPLA, a calibração primária em campo livre de um microfone LS2 (microfone de medição padrão de laboratório de meia polegada) que forneceu os resultados e as incertezas de referência para o cálculo do $|En|$.

O módulo do erro normalizado é apresentado na Figura 17. Observa-se que o critério para a validação é atendido para todas as frequências centrais das bandas de terço de oitava de 1 kHz a 40 kHz (faixa de frequência medida) considerando-se então que a técnica está validada em relação à técnica utilizada pelo DPLA.

Fig. 17 - Módulo do erro normalizado [1].

7 CONCLUSÃO

A técnica de medição desenvolvida no Inmetro alcançou o objetivo de identificar e remover as imperfeições na determinação da impedância de transferência elétrica causando efeitos nocivos na resposta em frequência do microfone menores que os causados pela técnica proposta por Barrera-Figueroa.

A boa concordância entre as sensibilidades determinadas utilizando diferentes distâncias entre os microfones permite que as medições sejam realizadas em uma única distância. Esta técnica permite ainda que a faixa de frequência medida seja estendida para frequências abaixo de 1 kHz.

A incerteza estimada pelo Inmetro é da mesma ordem de grandeza das estimadas pelos institutos nacionais de metrologia que oferecem este serviço de calibração.

A técnica mostrou-se suficientemente robusta, tendo sido implementada pelo Inmetro como parte do sistema primário de calibração de microfones em campo livre. Em janeiro de 2008, a técnica de medição desenvolvida no Inmetro tomou parte da intercomparação laboratorial CCAUV.A-K4 sendo que o relatório final desta intercomparação ainda não está disponível [9].

ABSTRACT

This paper presents the measurement technique, developed and implemented in Inmetro, for the free-field calibration of measurement microphones by the primary method. In this technique, the crosstalk is removed by subtraction and the multiple backscattering and the other reflections are removed by a time selective technique.

Keywords: primary method; free-field; measurement microphones.

REFERÊNCIAS

- [1] Milhomem, T. A. B, Técnica para Calibração de Microfones de Meia Polegada por Reciprocidade em Campo Livre, Dissertação de M. Sc., Programa de Engenharia Mecânica, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [2] 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.
- [3] SOARES, Z., Calibração de Microfones com Resposta Impulsiva, Tese de Dr. Eng., Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.
- [4] RASMUSSEN, K., "A Note on Free-field Reciprocity Calibration", DPLA Calibration Workshop, 2003.
- [5] 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.
- [6] MÜLLER, S., "Integrated System for Measurements in Acoustics", The 34th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Inter-noise 2005, Aug. 2005.

[7] ABNT, INMETRO, Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 3 ed., Rio de Janeiro, Inmetro, 2003.

[8] ABNT ISO/IEC GUIA 43-1: Ensaios de Proficiência por Comparações Interlaboratoriais – Parte 1: Desenvolvimentos e Operação de Programas de Ensaios de Proficiência, 1 ed., 1999.

[9] BIPM, List of key comparisons. Disponível em: <<http://www.bipm.org>>. Acesso em: jun. 2009.