



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-075

Implementação de medição em tubo de impedância com um método de função de transferência

Paulo Massarani,
Marco Antonio Nabuco de Araujo

Laboratório de Ensaio Acústicos - Inmetro
Av. Nossa Sra. das Graças, 50 – Xerém – Duque de Caxias – RJ – 25250-020
Brasil. E-mail: pmmassarani@inmetro.gov.br

Abstract

An implementation of a transfer function method in the impedance tube, based on the ISO 10534-2:1998 standard, is described in this work. The method deploys just one microphone which can be located to any position along the tube. A swept sine was used as excitation signal to obtain the transfer function. The signal has been designed to optimize the S/N ratio in the entire range up to the tube's cut-off frequency. The measurement system was developed at the Inmetro and its main characteristic is the integration of all components needed for the signal conditioning in just one compact device: power and pre-amplifiers, microphone supply voltages and AD/DA converters. A detailed interpretation of the method in the impulse response domain is also presented, after a small modification of the transfer function based equation for the sound reflection factor calculation. To minimize bias errors caused by internal resonances, a windowing operation over the impulse response is proposed as an intermediate step of the signal processing. Some results for a rigid tube termination are presented, showing the repetition and the influence of microphone position errors.

Resumo

Esse trabalho descreve a implementação de um método para medição de absorção sonora de materiais em tubo de impedância baseado na identificação de funções de transferência, conforme descrito na norma internacional ISO 10534-2:1998. O método utiliza um microfone mantido no centro da sua seção transversal, o qual pode ser posicionado livremente ao longo do seu comprimento. As funções de transferência são identificadas pela utilização de uma varredura de senos como sinal de excitação, otimizada para manter alta relação sinal/ruído numa faixa de frequência até a frequência de corte do tubo. O sistema de medição utiliza um protótipo de equipamento desenvolvido no Inmetro. O equipamento integra um amplificador de áudio compacto de baixa distorção, condicionadores de sinais de microfones e conversores A/D e D/A de alta resolução. Cabe ao programa de computador "Monkey Forest" o controle da medição. A fórmula de cálculo da reflexão sonora foi rescrita para permitir interpretações das etapas intermediárias do método sobre respostas impulsivas. É proposta uma etapa adicional de processamento em resposta impulsiva que reduz erros sistemáticos causados por múltiplas reflexões no tubo. São apresentados resultados obtidos para uma terminação rígida, para verificar a repetitividade e as influências de erros no posicionamento do microfone.

1 Introdução

O interesse desse trabalho é o método de ensaio de absorção sonora em tubos de impedância utilizando a técnica da função de transferência, descrita na norma internacional ISO 10534-2 de 1998 [1]. Considera-se a propagação de ondas planas nos tubos, ou sejam ondas propagantes sem alteração de forma no eixo longitudinal. O sistema para medição é completado com a instalação de uma fonte sonora em uma das extremidades do tubo e uma amostra de material na outra. No método, dois pontos de captação distantes no comprimento do tubo, são suficientes para separar ondas incidentes e refletidas na amostra.

O método da função de transferência é uma técnica de medição engenhosa que foi apresentada, na forma como utilizada na norma [1], há 28 anos atrás no clássico artigo de Chung e Blaser [2]. Na época, havia um crescente uso de analisadores de FFT de dois canais, cujo princípio de funcionamento é correlacionar pares de sinais aleatórios e a realização de médias. O fator de reflexão complexo em função da frequência, R , é calculado pela equação (1). As duas posições de microfones, designados por 1 e 2, bem como as definições das distâncias no tubo são apresentadas na Figura 1. A função de transferência entre as duas posições de microfones é representada por H_{12} . Os termos complexos e^{iks} e e^{-iks} , onde k é o número de onda e s é a distância entre os pontos, expressam teoricamente a diferença de fase nos dois sentidos de propagação no tubo. Outra correção de fase é necessária para transpor a reflexão até a superfície do material, multiplicando-se o termo e^{-ik2l} , onde l a distância do ponto mais distante da amostra até a face da amostra. Com o valor de R complexo determina-se a impedância e o coeficiente de absorção sonora.

$$R = \frac{(H_{12} - e^{iks})e^{-ik2l}}{e^{-iks} - H_{12}} \quad (1)$$

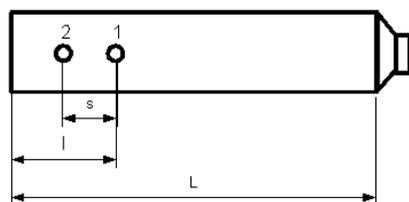


Figura 1. Posições de microfones, pontos 1 e 2, e distâncias no tubo.

Algumas novidades nas técnicas de processamento de funções de transferência inevitavelmente ocorreram nesses anos. Sinais determinísticos substituem com vantagens os sinais aleatórios, diminuindo o tempo de medição e melhorando a repetitividade. A função de transferência H_{12} pode ser determinada pela razão entre duas funções de transferência determinadas separadamente entre o sinal de excitação que alimenta a fonte e as respostas nos microfones. Um único microfone pode ser utilizado, sendo deslocado nas 2 posições em seqüência. Com os sinais determinísticos é possível também obter com muito menos esforço as respostas impulsivas do sistema, relacionadas às funções de transferência pela transformada inversa de Fourier (IFFT).

Nesse trabalho, apresenta-se uma aplicação de medição em tubo com um método da função de transferência, determinada pelo uso de sinais de varreduras de senos como excitação [3]. Foi utilizado um tubo de impedância comercial projetado para medição de absorção por um método de ondas estacionárias. O tubo foi adaptado com a instalação de um

microfone de eletreto na sua sonda de prospecção. Um dos objetivos da implementação foi descrever as etapas de processamento no domínio do tempo, através das respostas impulsivas. Com a reorganização da equação (1) foi possível mostrar a ação das defasagens na separação das partes incidente e refletida. Uma etapa adicional é sugerida para minimizar o efeito sistemático de múltiplas reflexões nas extremidades do tubo. O sistema completo permite análises sobre o método, sendo possível modificar livremente as distâncias entre microfones e do par de microfones para a amostra. São apresentados resultados com uma terminação rígida explorando a influência da alteração de parâmetros do método.

2 Medição de função de transferência com varredura de senos

As estimativas das funções de transferências aplicadas neste trabalho são obtidas pela utilização de varredura de senos, em especial na seqüência de etapas ilustradas na Figura 2. O sinal de excitação, varredura de senos, foi especialmente construído com propriedades convenientes para as medições, segundo as indicações da referência [3]. A primeira propriedade é a manutenção da amplitude do sinal constante, otimizando a energia injetada no sistema em relação a determinado nível máximo do sinal. Entretanto, foi dada uma ênfase diferenciada no espectro de frequência. Isso é possível controlando-se a frequência instantânea dos senos da varredura, de forma a prolongar a duração dos senos nas frequências onde são necessárias maiores ênfases de amplitude. A varredura aqui utilizada foi projetada para fornecer uma ênfase em amplitude em frequências ao redor de 100 Hz. Adicionalmente, a construção da varredura limitou-se a frequências abaixo de 1 kHz, impedindo a propagação de ondas diferentes das ondas planas longitudinais que ocorrem a partir da frequência de corte do tubo.

O sinal de excitação amplificado alimenta o alto-falante do tubo, gerando o campo sonoro, posteriormente captado por um microfone e amplificado. O sinal captado é a resposta do sistema de medição à excitação. A função de transferência, FT, é determinada pela razão do espectro da resposta do sistema à excitação, obtida pela FFT do sinal captado, pelo espectro do próprio sinal de excitação. Pode-se denominar o espectro do denominador dessa razão como espectro de referência. A própria varredura de senos é utilizada para compor o espectro de referência, após uma FFT.

A resposta impulsiva do sistema, RI, é obtida aplicando-se uma IFFT da função de transferência. A contribuição do sistema acústico concentra-se no início da resposta impulsiva e a sua duração inclui múltiplas reflexões nas extremidades do tubo. No restante da resposta impulsiva sobram o ruído de fundo e distorções [3]. O gráfico à esquerda da Figura 3 apresenta as distribuições de energia na resposta impulsiva do sistema e do ruído de um tubo com uma terminação rígida. A contribuição da resposta do sistema é notável até 200 ms. Na curva à direita está ilustrada a relação sinal / ruído no domínio da frequência, resultado obtido selecionando-se os primeiros 200 ms da resposta impulsiva e do ruído para uma única lançada de varredura. Os valores são ao redor de 70 dB na banda de frequências útil de medição.

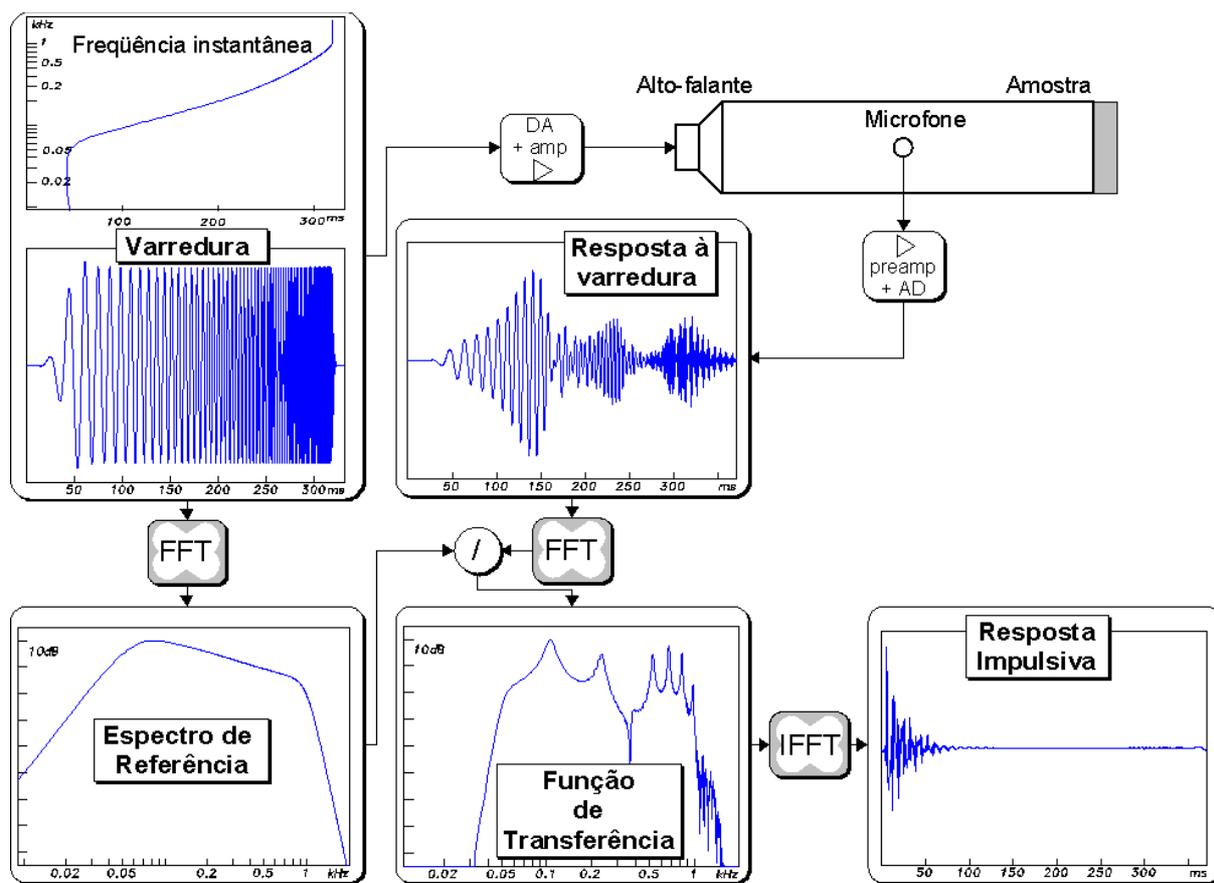


Figura 2. Diagrama de medição de função de transferência no tubo com varredura de senos.

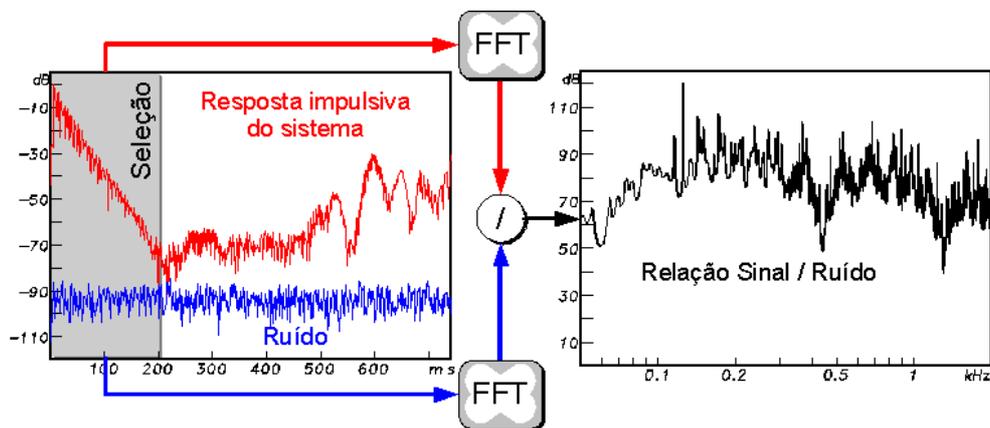


Figura 3. Energia da resposta impulsiva no duto e ruído, à esquerda, relação sinal / ruído, à direita, e o fluxo de dados para o cálculo.

3 Função de transferência (FT) e resposta impulsiva (RI) no tubo

A função de transferência entre a excitação e o sinal de pressão sonora captado pelo microfone em um ponto no interior do tubo tem um padrão que pode ser interpretado com auxílio da resposta impulsiva correspondente. A Figura 4 apresenta as RIs e FTs obtidas em um tubo com um microfone em 3 distâncias diferentes de uma terminação rígida. Na parte à

esquerda pode-se examinar o efeito da mudança de posição do microfone na RI. Picos bem definidos localizam tempos de chegada das ondas incidente e refletida na terminação. Depois é percebida a chegada da reflexão no alto-falante, seguida das reflexões sucessivas nas extremidades do tubo. Conforme o microfone vai se afastando da extremidade rígida, o espaço de tempo entre os picos incidente e refletido vai aumentando, com o pico incidente ocorrendo em tempos de chegada menores e o pico refletido em tempos maiores. Ao contrário, o intervalo entre o pico refletido e a reflexão no alto-falante diminui. As amplitudes das FTs, no lado direito da Figura 4, apresentam uma combinação de 2 padrões de oscilações, um associado aos picos incidente e refletido da RI e o outro independente da posição do microfone. Os padrões foram analisados detalhadamente por Bodén e Abom [4] e identificados como fontes de erros sistemáticos do método. Com auxílio da Figura 5 é possível descrever resumidamente a origem dos padrões de oscilação em uma FT. A curva preta da Figura foi obtida da RI integral, ou seja incluindo os picos incidente e refletido e todas as sucessivas reflexões nas terminações. Quando são isolados somente os primeiros picos incidente e refletido, curva vermelha da Figura 5, resta um padrão de oscilação com vales profundos que depende da posição do microfone conforme a Figura 4. Se forem retirados os picos refletidos, restando o pico incidente e suas sucessivas reflexões, curva azul da Figura 5, surge o outro padrão de oscilação que independe da posição do microfone.

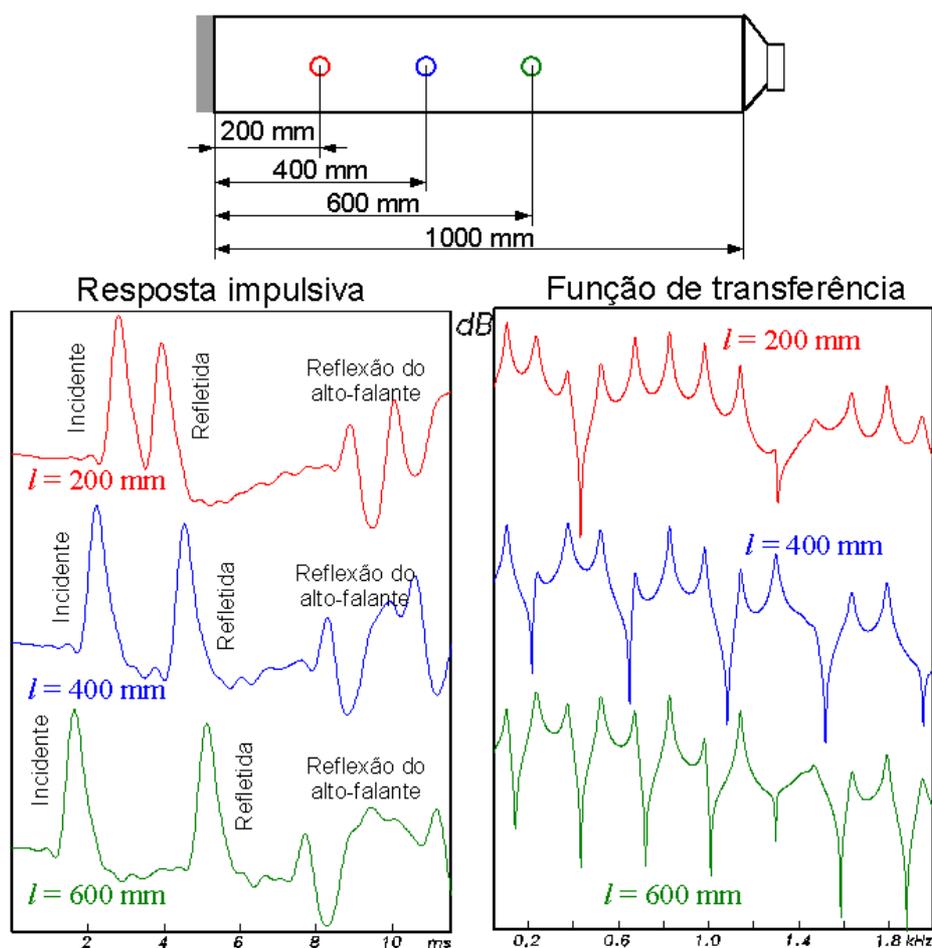


Figura 4. Respostas impulsivas e funções de transferência em pontos distintos de um tubo com terminação rígida.

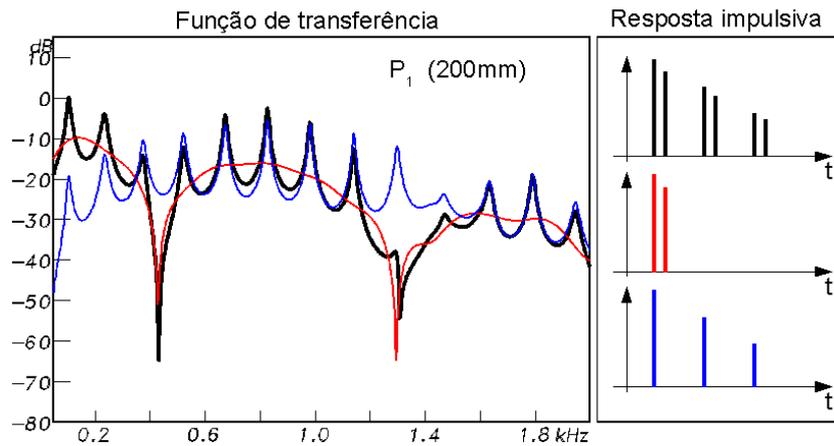


Figura 5. Associação entre os padrões da FT e as RI.

A análise para associar as flutuações de amplitude na FT pelas características da RI sugere a possibilidade de minimizá-las pela ação de processamento adicional. A seguir apresenta-se uma proposta de processamento de RI.

4 Alteração do método

Na equação (1) a FT H_{12} é tradicionalmente dependente da correlação cruzada entre os dois pontos de microfone. Entretanto, quando são utilizados métodos de identificação com excitação determinística, como as varreduras de senos, a FT é uma razão entre duas funções determinadas independentemente, $H_{12}=P_2/P_1$. Cada uma das funções P_1 e P_2 relaciona a saída do microfone com o sinal de excitação. Uma simples reorganização da equação (1) é obtida na seqüência de equações:

$$R = \frac{(P_2/P_1 - e^{iks})e^{-ik2l}}{e^{-iks} - P_2/P_1} \quad (2)$$

$$R = \frac{(P_2 - P_1 e^{iks})e^{-ik2l}}{P_1 e^{-iks} - P_2} \quad (3)$$

Além da eliminação da divisão entre as FTs na equação (3) somente P_1 será defasada por ks , porém em sentidos opostos no numerador e denominador. As etapas da equação podem ser analisadas no domínio do tempo, ou nas RIs. A Figura 6 mostra RIs obtidas em um tubo com terminação rígida em algumas etapas intermediárias da equação (3) com as distâncias e pontos de captação assinalados na Figura 1. Os pulsos incidentes e refletidos nas posições 1 e 2 são defasados por ks , sendo que o incidente de P_2 está atrasado em relação ao incidente de P_1 e o refletido está adiantado, conforme pode ser visto nas RIs no canto superior esquerdo da Figura 6. No numerador da equação a RI na posição P_1 é atrasado e a amplitude é invertida (ver as RIs no canto superior direito).

A adição dessas duas últimas RIs resulta na eliminação do pulso incidente e na composição de dois pulsos refletidos, porém com sinais invertidos e defasados por $2ks$. De forma semelhante, a subtração das RIs do denominador resulta na eliminação do pulso refletido e composição de dois pulsos incidentes defasados. Portanto, a divisão resulta em uma relação entre 2 pulsos refletidos por 2 pulsos incidentes e uma série de reflexões

sucessivas nas duas extremidades do tubo (canto inferior esquerdo da Figura 6). A presença das reflexões sucessivas gera um padrão de interferência nas FT (ver Figura 7 à esquerda) como já mencionado no item anterior. A defasagem $2kl$ no denominador da equação (3) corrige o atraso do numerador em relação ao denominador (canto inferior direito da Figura 6).

Neste ponto de processamento, este trabalho propõem a aplicação de uma janela nas RIs correspondentes ao numerador e denominador da equação (3). A janela elimina as reflexões sucessivas nas extremidades do tubo, conforme indicado na Figura 6, minimizando o padrão de interferência como mostra a Figura 7. A Figura 8 apresenta uma comparação de resultados obtidos para um mesmo par de FTs P_1 e P_2 , porém aplicando a equação (1) e a equação (3) com a etapa de janelamento incluída. No caso, a amostra foi uma superfície rígida, onde a expectativa é de valores unitários para a amplitude do fator de reflexão, $|R|$, e fase nula, ϕ . A ação da etapa de janelamento reduziu consideravelmente as variações em torno dos valores esperados.

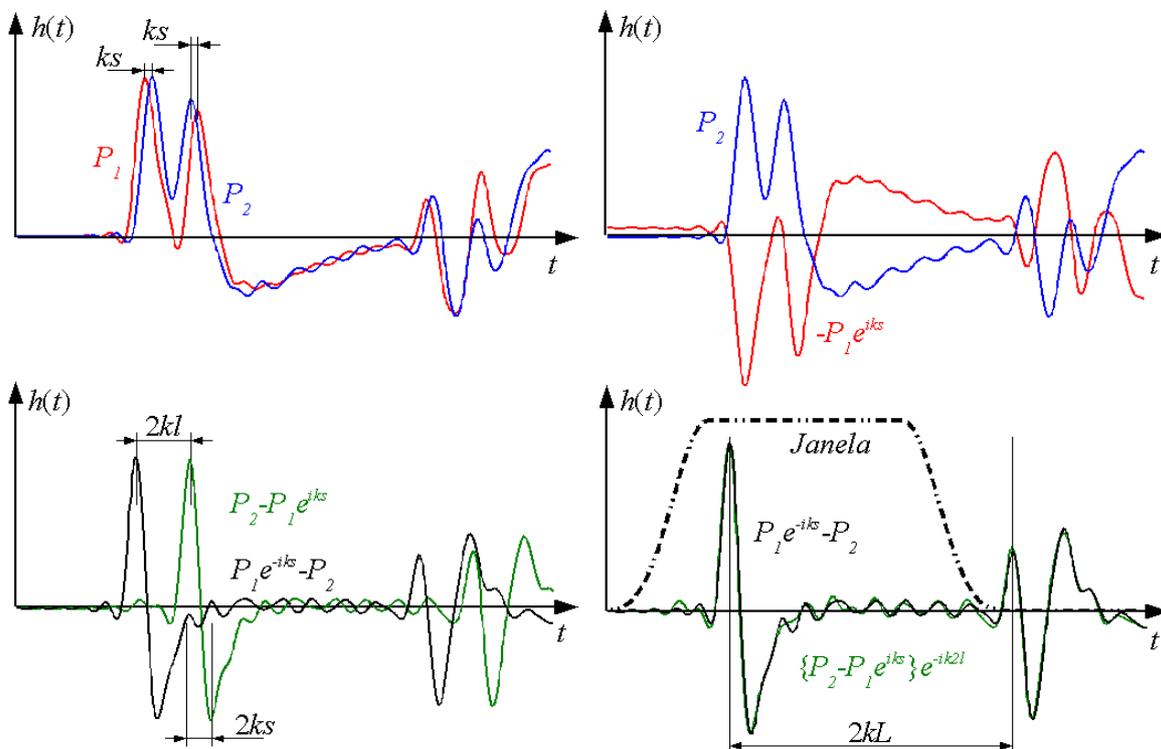


Figura 6. Representação no domínio do tempo das etapas da equação (3).

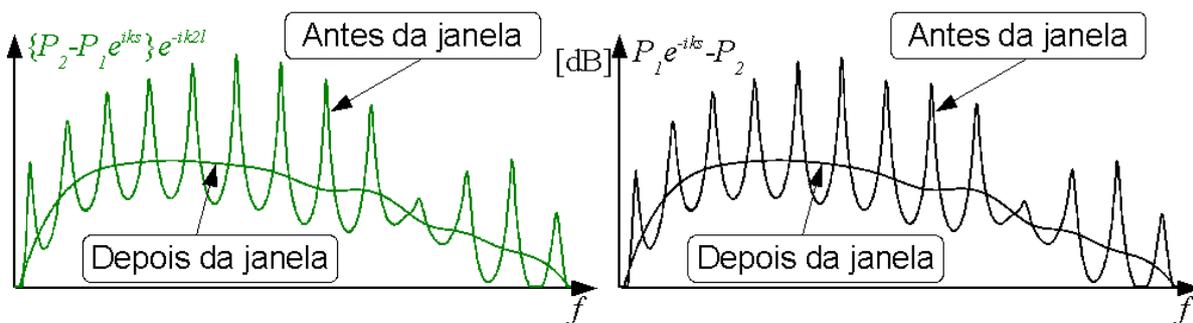


Figura 7. Numerador (esquerda) e denominador (direita) da equação (3) no domínio da frequência antes e depois da janela na RI.

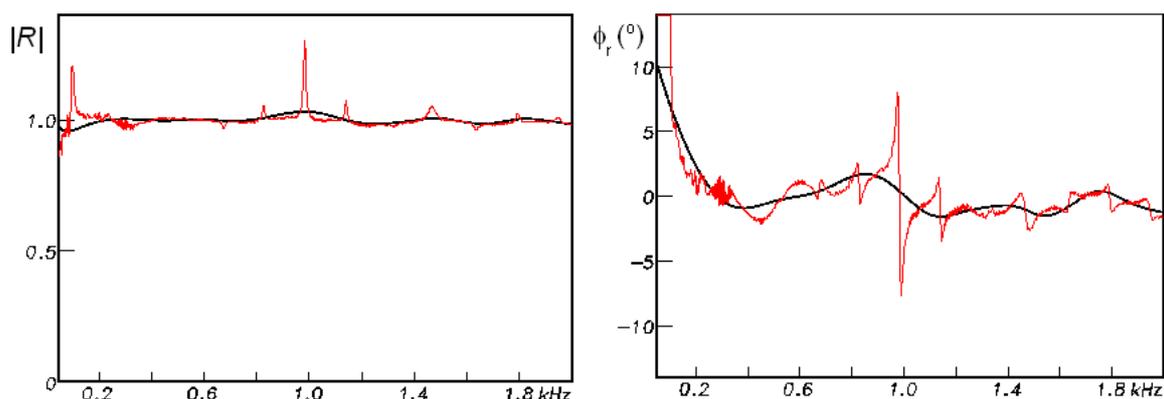


Figura 8. Comparação de resultados de uma terminação rígida obtidos com a equação (1), curvas vermelhas, e a equação (3) com janelamento, curvas pretas.

5 Implementação do método

O método foi implementado em um antigo tubo de impedância projetado originalmente para a aplicação da técnica de ondas estacionárias. A posição de captação de pressão sonora no seu interior é determinada por uma sonda, um carro e uma régua com marcações, conforme representado na Figura 9. Na ponta da sonda foi adaptado um microfone de eletreto de 1/4". As medições das funções P_1 e P_2 são obtidas sequencialmente, demarcando l e s na régua. O sistema assim configurado permite a realização do método da função de transferência com livre escolha dos parâmetros. A parte de processamento ficou a cargo do programa "Monkey Forest", incluindo a construção da varredura de senos e os passos ilustrados na Figura 2. Para completar o sistema foi utilizado um dispositivo desenvolvido no Inmetro (denominado CMF-22) que integra pré-amplificador de sinais, fornecimento de tensão de alimentação de microfones, conversores ADA (frequência de aquisição de 192 kHz e 24 bits) e amplificador de áudio de 2X 70 W (*Class-H*).

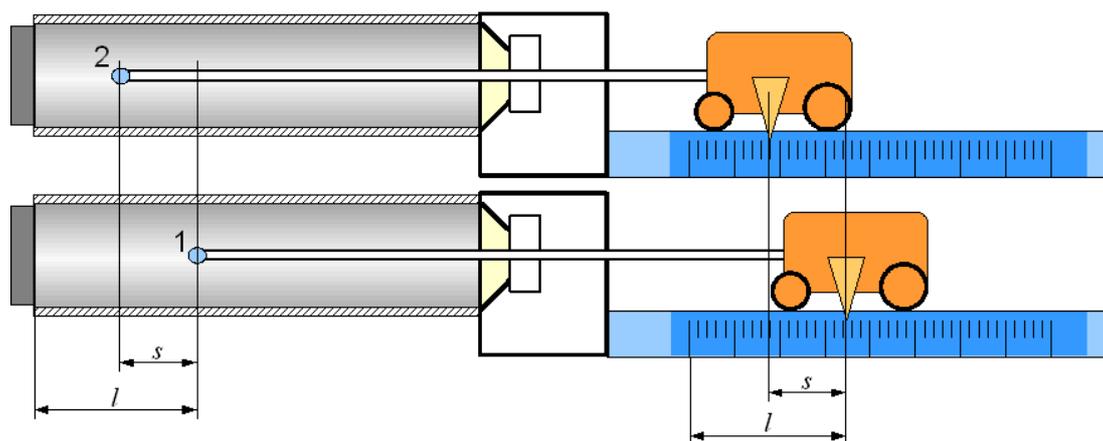


Figura 9. Posicionamento do microfone no tubo de ondas estacionárias.

O sistema foi ajustado utilizando-se uma superfície rígida na terminação da amostra. Além de fornecer resultados teóricos previsíveis, ou seja amplitude do fator de reflexão unitária, $|R|$, e fase nula, ϕ_r , a superfície rígida é mais sensível à propagação de erros de

medição [4]. As funções P_1 e P_2 após determinadas são armazenadas em arquivo. O cálculo da equação (3) é efetuado no domínio da frequência até a obtenção em separado do numerador e denominador. Então é efetuada uma operação IFFT, transpondo ambos para o domínio do tempo, no qual se aplica a janela. Em seguida é efetuada uma FFT do numerador e denominador janelados e a divisão é completada. Foi necessário estabelecer um processo para determinação da defasagem $2kl$ correta. O microfone adaptado à sonda é posicionado com a sua face direcionada para a terminação da amostra, sendo necessário considerar o seu centro acústico.

Para determinar o erro do posicionamento livre do microfone com o carro, foram feitas medições repetidas em uma terminação rígida para distâncias nominais de l e s . A Figura 10 apresenta os desvios de amplitude e de fase de 5 repetições para $l = 200$ mm e $s = 50$ mm. O desvio de amplitude permaneceu abaixo de 0,1 % para frequências acima de 200 Hz. O desvio de fase mostra uma tendência de aumento conforme a frequência aumenta, demonstrando que o posicionamento afeta mais a fase em altas frequências. Foi feita uma análise de erro forçado no posicionamento, para uma distância nominal $s = 50$ mm quando as posições dos microfones foram intencionalmente alteradas em 5 mm (10 % de erro). O erro médio em amplitude foi de 0,2 % na banda útil de frequência. O desvio em fase, crescente em frequência, atingiu 20 graus. Foram também verificados os desvios de resultados obtidos para vários valores de l fixando-se o valor de s . Para 4 diferentes l foram observados desvios na ordem de 1 % na amplitude e 1 grau na fase de R .

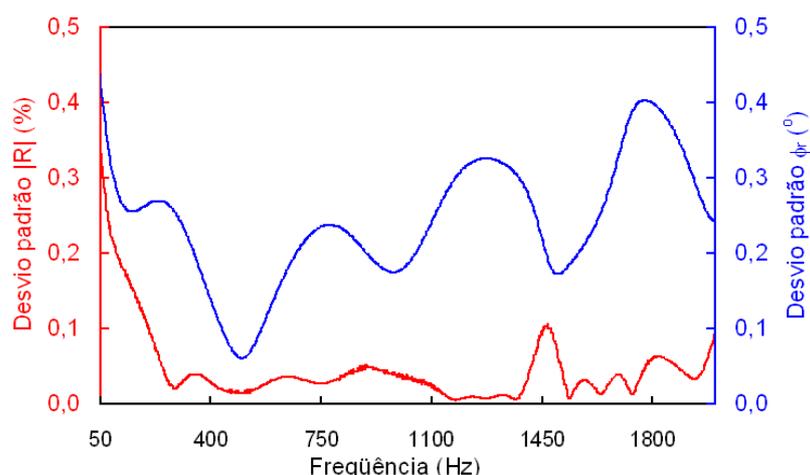


Figura 10. Desvios padrão de 5 repetições de terminação rígida para $l = 200$ mm e $s = 50$ mm.

6 Conclusões

A implementação do método revitalizou um tubo de impedância antigo projetado para medições com o método de ondas estacionárias, descrito na parte 1 da norma ISO 10534 [1]. O tubo tem uma boa estrutura mecânica e estava em excelentes condições, porém o método de ondas estacionárias consome um tempo muito longo de medição. A adaptação mecânica para a implementação foi bem simples e não alterou consideravelmente as características construtivas originais. O microfone de eletreto, mesmo sendo de baixo custo, mostrou-se mais adequado ao processamento dos sinais digitais aplicados do que o conjunto sonda / microfone original. Com a utilização da varredura de senos foi possível atingir uma elevada relação sinal / ruído, minimizando a influência de erros aleatórios nos resultados [4], sem a necessidade de realizar médias. Com isso também a medição mostrou-se extremamente rápida.

Fazendo-se proveito dos recursos do programa "Monkey Forest" e do dispositivo integrado de medição desenvolvido no Inmetro foi possível distinguir detalhadamente cada etapa do método tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. Com o objetivo de melhorar a interpretação das etapas do método no domínio do tempo, ou seja nas respostas impulsivas, a fórmula de cálculo foi ligeiramente re-arrumada. Como consequência, foi possível propor uma operação de seleção de sinal no tempo, janelamento, que eficazmente reduz a influência de erros sistemáticos nos resultados [4]. Os resultados preliminares para superfície rígida, descritos acima, são encorajadores. Comparações de resultados obtidos de um material absorvente com os obtidos por outro tubo e outro método, não apresentados nesse trabalho, também apresentaram boa concordância.

Futuramente serão realizadas mais medições, testando outros materiais e diversificando os parâmetros do método, como: número de posições de microfones, distâncias e variações no janelamento. O método da função de transferência modificado tem potencial utilização em dispositivos de medição de absorção em campo livre ou *in situ*.

Além do aspecto metrológico, o sistema implementado mostrou-se uma ferramenta didática a ser utilizada em demonstrações ou aulas práticas. A rapidez da medição de funções de transferência ou respostas impulsivas e a flexibilidade em posicionar o microfone em qualquer ponto longitudinal do tubo, permitem demonstrar os efeitos das mudanças de posição de microfone e de terminação quase em tempo real, em qualquer um dos domínios do tempo ou da frequência.

Referências

- [1] ISO 10534-2:1998, Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method.
- [2] Chung, J.Y.; Blaser, D.A. (1980). "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory, II. Experiment". JASA, 68, 3, 907-921.
- [3] Müller, Swen; Massarani, Paulo (2001). "Transfer-Function measurement with sweeps". JAES, 49, 6, 443-471.
- [4] Bodén, Hans; Abom, Mats (1986). "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts". JASA, 79, 2, 541-549.