

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESPOSTA IMPULSIVA

Bruno Sanches Masiero^a & Fernando Iazzetta^b

^aDepartamento de Música, ECA/USP

^bDepartamento de Engenharia de Telecomunicações, POLI/USP

e-mail: bruno.masiero@poli.usp.br, iazzetta@usp.br

Resumo: Este projeto faz uma revisão nas diferentes técnicas de medição da resposta impulsiva acústica e de alguns dos parâmetros físicos para acústica de sala. É feita uma revisão sobre sistemas lineares e invariantes no tempo e métodos de obtenção da resposta impulsiva acústica, com ênfase no método da seqüência de máximo comprimento e no método desenvolvido recentemente da varredura logarítmica. É feita uma revisão nos parâmetros acústicos para salas, assim como métodos de processamento da resposta impulsiva para sua obtenção.

1. MÉTODOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA DE SALAS

1.1 Métodos de Obtenção da Resposta Impulsiva

A resposta impulsiva acústica é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac [1]. A resposta impulsiva (IR) de um espaço acústico fornece uma descrição precisa desse sistema. Todos os parâmetros acústicos definidos pela norma ISO 3382 [2] são derivados diretamente da IR acústica.

A norma ISO 3381 faz algumas considerações importantes quanto à medição da IR acústica. Por definição, a IR acústica é medida com pares de emissor-receptor. Na acústica de salas, a IR obtida entre um receptor e um emissor caracteriza o sistema acústico entre a localização exata desses dois itens, mas essa IR não pode usada para caracterizar a resposta da sala como um todo. Para a obtenção dos parâmetros acústicos de uma sala, essa norma recomenda a medição da IR de da sala deve em um mínimo de dezoito posições distintas, posteriormente obtendo-se a média energética destas IR. Microfones e alto-falantes usados para este fim devem ser omnidirecionais.

Os principais métodos de medição acústica de salas são descritos a seguir.

1.1.1 Excitação por Impulsos

A primeira idéia que vem à mente, para a obtenção da resposta impulsiva de uma sala, é excitá-la diretamente com um impulso. Este impulso pode ser criado de forma analógica, como, por exemplo, com disparos de armas de fogo. Como impecílho, este método apresenta uma baixa repetibilidade e reduzida relação-sinal-ruído (SNR). Para melhorar sua repetibilidade, o sinal pode ser gerado de modo digital e ser posteriormente convertido para um sinal analógico (via um conversor DA). A resposta obtida na sala quando excitada por esse sinal já é a própria IR, não sendo necessário nenhum pós-processamento. Para diminuir a influência de ruído, pode-se reproduzir o impulso periodicamente – tomando o cuidado do período entre dois impulsos ser maior que o tempo de reverberação da sala – e posteriormente realizar uma média temporal destas respostas.

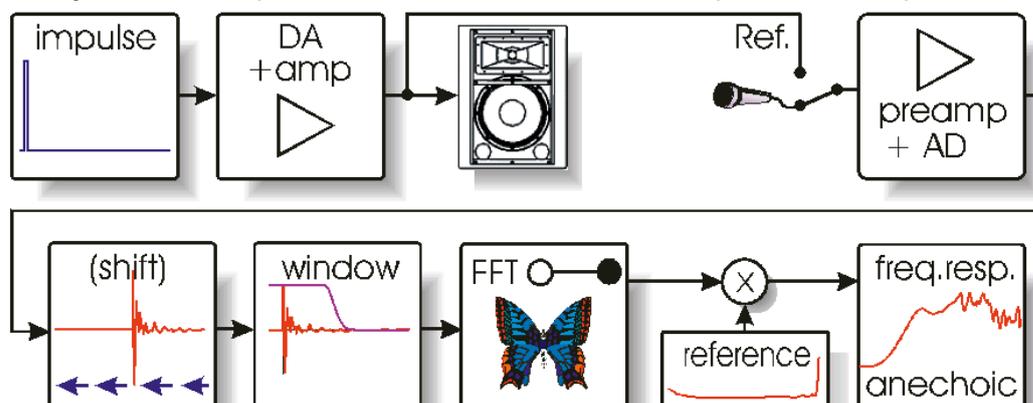


Figura1: Esquema do método de medição por impulso (ver [5])

Este é um método simples e rápido, mas também muito suscetível ao ruído [3]. O resultado irá sempre possuir um erro sistemático, uma vez que na prática é impossível gerar um impulso perfeito (espectro perfeitamente plano).

1.1.2 Excitação Estática

Este método pode ser considerado dual ao método do impulso. Ao invés de excitar-se a sala com um impulso (cujo espectro contém todas as frequências de interesse), excita-se a sala com uma seqüência de senóides, com suas respectivas frequências variando passo-a-passo. Existem várias possibilidades de reduzir-se a influência do ruído neste tipo de medição, entre elas, filtrar-se o sinal com um filtro passa-faixa estreito sintonizado para a frequência desejada (possível distorção de fase) ou, por meio de FFT, verificar a amplitude na frequência desejada (fundamental) – as frequências devem ser escolhidas de forma a evitar-se erro de cercamento. Esse último método é preferível em relação aos demais, uma vez que a amplitude da fundamental é claramente observável frente ao ruído.

A função de transferência é obtida comparando-se amplitude e fase da senóide recebida com a senóide enviada para as diversas frequências utilizadas. O passo de variação da frequência deve ser definido de acordo com a resolução desejada. Em medições acústicas, a variação de frequência costuma ser logarítmica. Deve-se notar que a resolução neste tipo de medição será muito inferior à das medições com sinais de banda larga.

A vantagem deste método se encontra na elevada SNR, uma vez que o sinal de excitação concentra toda sua energia em apenas uma faixa de frequência, garantindo boa precisão na medição. Sendo assim, apesar de demorado, este método é bastante útil para medidas de precisão. Com ele é possível também verificar um possível comportamento não-linear da sala, uma vez que possíveis harmônicas podem ser vistas claramente no espectro do sinal recebido.

1.1.3 Time Delay Spectrometry (TDS)

Seguindo a idéia da excitação estática, podemos agora usar uma senóide com frequência variando no tempo como sinal de excitação. No TDS usa-se então uma varredura linear de frequência.

Segundo Heyser [4], a função de transferência da sala pode ser obtida com um filtro passa-faixa estreito que tem sua frequência central variando na mesma taxa que o sinal de varredura. A implementação de um filtro como este é bastante complicada, logo é comum o uso de um banco de filtros estreitos sincronizados. Para evitar o uso destes filtros, pode-se multiplicar o sinal recebido pelo sinal enviado atrasado no tempo (de forma a compensar o tempo de propagação do som na sala) e posteriormente filtrar o produto por um filtro passa-baixa, como explicado por Muller & Massarani [5]. Com a escolha correta da taxa de variação e da frequência de corte do filtro, componentes provenientes de distorção harmônica podem ser eliminadas da medição – o que permite a esse método realizar medições de sistemas não lineares – assim como o ruído acima da frequência de corte do filtro.

Um outro problema do TDS é o efeito de batimento presente nas baixas frequências. Para se corrigir este problema, é sugerido por Vanderkooy [6] e Greiner [7] que se realize a medição num sistema dual, alimentado com um sinal em quadratura, ou seja, realizar uma varredura de cosseno e outra de seno, e depois somá-las. Com isso, a componente de soma é eliminada, restando somente o dobro da componente de diferença. Se os pontos de início das varreduras estiverem perfeitamente sincronizados, a diferença será sempre nula, e com isso a presença do filtro PB torna-se redundante e até inconveniente, uma vez que ele iria eliminar a influência das reflexões da sala na medida.

$$\begin{aligned} \cos(x) \cdot [h(f) \cdot \cos(y)] &= h(f) \cdot \left\{ \frac{1}{2} [\cos(x-y) + \cos(x+y)] \right\} \\ \sin(x) \cdot [h(f) \cdot \sin(y)] &= h(f) \cdot \left\{ \frac{1}{2} [\cos(x-y) - \cos(x+y)] \right\} \end{aligned} \quad (1.1 - 1)$$

$$\overline{\cos(x) \cdot [h(f) \cdot \cos(y)] + \sin(x) \cdot [h(f) \cdot \sin(y)]} = h(f) \cdot \cos(x-y)$$

O fato de excitar-se a sala com dois sinais distintos estenderá o tempo necessário para realizar-se a medição, mas ainda assim, se comparado com os demais métodos, o tempo necessário é consideravelmente pequeno. Esta repetição implica em melhoria da SNR, já que realiza-se uma média temporal do ruído.

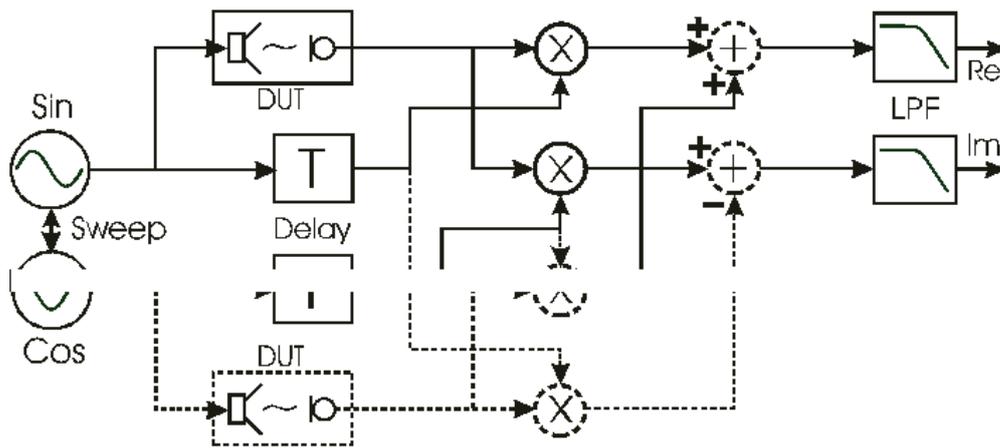


Figura 2: Esquema de medição do método TDS

A razão para o uso de uma variação linear no TDS é a diferença de frequência entre o sinal direto e as reflexões ser constante por toda a medição, mantendo assim a atenuação dessas componentes também constantes no tempo.

A varredura linear possui um espectro branco. Como o sinal apresenta maior energia na região aguda do espectro, existe uma tendência de uma reduzida SNR na região graves. Para corrigir-se este problema pode-se usar um sinal de excitação bastante longo ou realizar uma pré-ênfase do sinal.

1.1.4 Maximum Length Sequences (MLS)

Expandindo a idéia do uso de uma seqüência periódica de impulsos do item 1.1.1 para uma seqüência aleatória, tem-se então um ruído como sinal de excitação. O método MLS utiliza um grupo especial de ruídos como sinal de excitação, as seqüências pseudo-aleatórias de máximo comprimento – dentre os ruídos, este é o que fornece a melhor SNR de acordo com [3]. Este método é bastante popular nos dias de hoje em todo o mundo.

A obtenção da IR a partir da MLS recebida pode ser realizada eficientemente por meio da Transformada Rápida de Hadamard (FHT). Devido a restrições de quantidade de memória e tempo de processamento, era de vital importância nos anos 70 e 80 o uso de métodos eficientes como a FHT. Com a velocidade dos computadores atuais, a técnica MLS já não apresenta vantagem significativa frente às demais técnicas.

O método MLS é bastante vulnerável à não-linearidades do meio, tornando seu uso desaconselhável para medição de grandes espaços abertos.

O MLS, assim como o TDS, possui um espectro branco, ou seja, menos energia nos graves que nos agudos, o que pode ser contornado com a pré-ênfase do sinal [5].

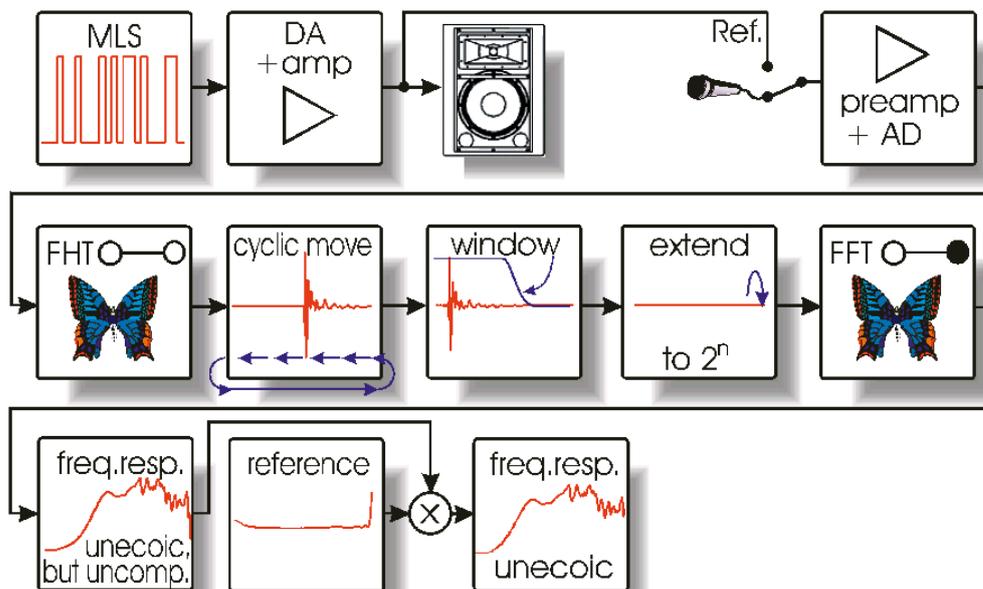


Figura 3: Esquema do método MLS (ver [5])

1.1.5 Análise por FFT

Esta é a única técnica que permite realizar medições acústicas durante uma apresentação musical, usando como sinal de excitação a própria música que está sendo executada (desde que esteja sendo reproduzida eletronicamente). A obtenção da IR é praticamente igual à do método anterior, baseando-se em comparar o espectro do sinal antes de ser enviado ao ambiente com um sinal capturado na sala em questão. Divide-se o espectro (deconvolução no domínio do tempo) do sinal capturado pelo espectro do sinal enviado.

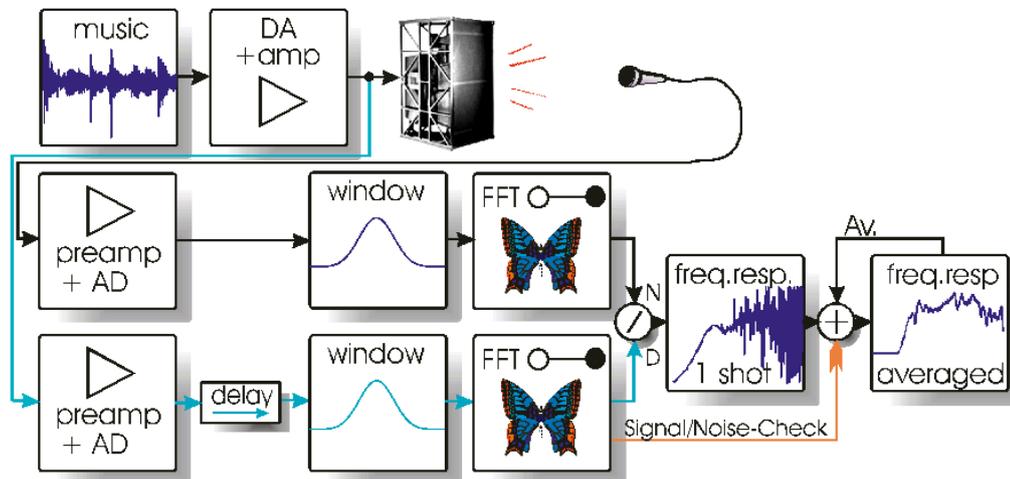


Figura 4: Obtenção da resposta em frequência com excitação qualquer (ver [5])

O uso de música como sinal de excitação não é recomendável, devido ao comportamento espectral inconsistente, bastante rugoso. Para este tipo de sinal é necessário considerar um longo período de tempo para a obtenção do espectro, e ainda assim é necessário realizar uma média com diversas realizações de medida, para obter-se um resultado consistente.

1.1.6 Varredura Logarítmica

Na análise por FFT, qualquer tipo de sinal de excitação pode ser usado. Recomenda-se então usar sinais de excitação que apresentem comportamento espectral favorável para medições, em especial ruído ou varredura.

Atualmente, existe a tendência de usar-se varreduras logarítmicas como sinal de excitação, por apresentarem boa distribuição da energia em seu espectro – possuem um espectro rosa – para aplicações acústicas [5] e serem bastante robusta a não-linearidades.

Quando uma MLS é usada como sinal de excitação, não-linearidades do sistema podem ser notadas na IR como rugosidades no sinal, repetições do sinal deslocadas no tempo e com menor amplitude. Quando a varredura logarítmica é usada como sinal de excitação, é possível isolar completamente a resposta impulsiva desejada das componentes presentes no sinal devido à não-linearidades. Isto é possível porque as harmônicas geradas por não-linearidades do sistema, após a deconvolução, aparecem em tempos negativos da IR.

A obtenção da IR dá-se da seguinte maneira:

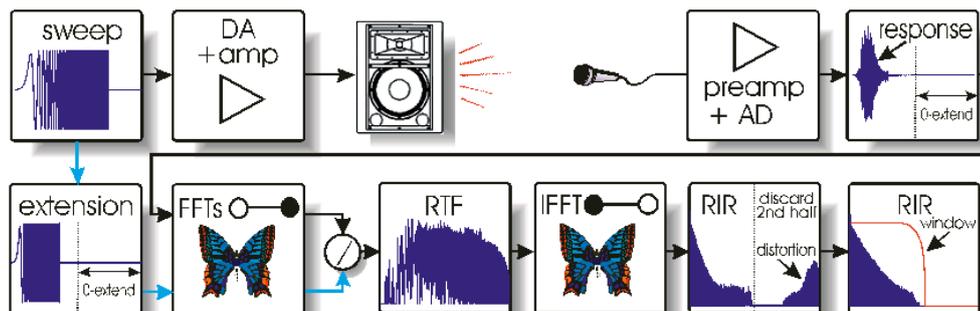


Figura 5: Deconvolução linear para a obtenção da resposta impulsiva por meio de varredura logarítmica (ver [5])

1.1.7 Gravador de Intensidade

Apenas como curiosidade, um dos primeiros métodos para medir a função de transferência de uma sala era usando-se um equipamento que gerava uma varredura logarítmica de senoide de forma analógica, e apenas retificava o sinal adquirido, desenhando a envoltória desse sinal numa folha de papel com escala logarítmica. Este método é bastante semelhante ao método TDS e poderia ser implementado nos dias de hoje de uma forma digital. A sua grande desvantagem é que por não fornecer informação da fase da função de transferência, ele não permite a obtenção da IR.

1.2 Correção Espectral

Praticamente todos os métodos apresentados na seção anterior podem ser realizados de forma digital, com o uso de um computador e uma placa de áudio. Estes equipamentos possuem respostas em frequência características, que alteram o espectro do sinal obtido. É possível reduzir a influência destes equipamentos na medição calculando-se a resposta em frequência destes aparelhos. Para tanto, basta realizar a medição da IR por qualquer método com a saída da placa de áudio ligada diretamente na sua entrada. Este será o espectro de referência do sistema.

Também é possível excluir o efeito da função de transferência do alto-falante fechando o circuito acústico. Isto é feito aplicando-se uma janela na IR de forma a excluir a influência da sala na medição. Por FFT, é possível obter a função de transferência do alto-falante, e também deconvolui-la do sinal. Para medição de tempo de reverberação e demais parâmetros da acústica de salas, a coloração do espectro pelo alto-falante não apresentará um grande problema, desde que a função de transferência do mesmo seja aproximadamente linear. Já para medições com o propósito de auralização, a coloração do alto-falante torna-se extremamente indesejável.

1.3 Processamento da IR para análise acústica de salas

Respostas impulsivas reais diferem em basicamente três aspectos das respostas impulsivas teóricamente esperadas:

1. Uma IR real apresenta um atraso antes da chegada do som direto, devido à velocidade de propagação do som.
2. decaimento pode conter várias partes com diferentes taxas de decaimento, ou nem mesmo ser exponencial.
3. A IR possui ruído de fundo, o que limita o decaimento a um certo patamar.

1.3.1 Determinação do início do sinal

Causado por atrasos de propagação do sistema, principalmente devido ao tempo que o som leva para se propagar do alto-falante ao microfone.

A norma ISO 3382 fornece a seguinte recomendação: “Determina-se o início do som direto a partir da IR de banda larga, como o ponto onde o sinal é 20dB menor que valor máximo da IR, mas significativamente maior que o ruído de fundo”.

1.3.2 Determinação do ponto de cruzamento entre decaimento e ruído

A subestimação do efeito do ruído pode causar um erro sistemático na obtenção dos parâmetros acústicos. A norma ISO 3382 propõe que o limite de integração superior da curva de decaimento seja tomado num ponto 10dB acima do ponto de cruzamento entre a assíntota de decaimento da IR e o nível de ruído. Desta forma, minimiza-se a energia de ruído presente na curva de decaimento.

A determinação do ponto de cruzamento tem um efeito considerável na curva de decaimento. Se o ponto de truncamento escolhido estiver muito antes do ponto de cruzamento, o tempo de decaimento será subestimado, e vice-versa.

1.3.3 Minimização da influência do ruído

Existem alguns métodos para minimizar a influência do ruído no cálculo da curva de decaimento, entre eles o método de Chu e o método de Hirata. O método de Lundebly também propõe-se a minimizar o ruído, mas também minimizando o efeito do truncamento.

Método de Chu: Para a minimização da interferência do ruído na obtenção da curva de decaimento, Chu [8] propôs subtrair-se da curva de energia da IR a estimativa do valor eficaz (RMS) do ruído, e posteriormente realizar-se a integração reversa de Schroeder.

Se o ruído for estacionário e a estimativa do nível do ruído for boa, o resultado da integral reversa de Schroeder fica bastante próximo da curva de decaimento ideal.

Método de Hirata: Hirata [9] propôs outro método simples para melhorar a SNR da curva de decaimento, substituindo a IR elevada ao quadrado pelo produto de duas IR medidas separadamente na mesma posição.

$$\begin{aligned} \int_t^\infty p^2(t)dt &\Rightarrow \int_t^\infty [p_1(t) + n_1(t)][p_2(t) + n_2(t)]dt = \\ \int_t^\infty [p_1(t)p_2(t) + p_1(t)n_2(t) + p_2(t)n_1(t) + n_2(t)n_1(t)]dt &= \\ \int_t^\infty [p_1(t)p_2(t)]dt + K(t) &\approx \int_t^\infty p^2(t)dt + K(t) \end{aligned} \quad (3.3 - 2)$$

As medidas consistem das respostas p_1 e p_2 e seus respectivos ruídos n_1 e n_2 . Como p_1 e p_2 são altamente correlacionados, eles fornecem valores positivos equivalentes à p^2 . Se o ruído afetando estas medidas for **não-correlacionado**, ele será visto como uma variação aleatória K superposta ao primeiro termo, fornecendo um resultado para a integral reversa de Schroeder bastante próximo da curva de decaimento ideal.

Método de Lundeby: Lundeby [10] propôs um algoritmo para determinação automática do nível de ruído de fundo, do ponto de truncamento e a taxa de decaimento da IR. Os passos do algoritmo são:

1. Toma-se a média da curva da IR elevada ao quadrado em intervalos de 10 a 50ms, o que fornece uma curva suavizada para o uso da regressão linear.
2. Faz-se uma primeira estimativa do ruído de fundo usando um segmento que contenha os últimos 10% da IR.
3. A taxa de decaimento da IR é estimada por regressão linear das médias locais entre o pico e o primeiro intervalo 5dB a 10dB acima do valor estimado para o ruído de fundo.
4. Estabelece-se um ponto preliminar de cruzamento na intersecção da assíntota do decaimento e do nível de ruído.
5. Determina-se um novo intervalo para realização das médias. Este intervalo é calculado de forma a obter-se de 3 a 10 intervalos a cada 10dB de decaimento.
6. Obtêm-se as médias da IR elevada ao quadrado nestes novos intervalos.
7. Determina-se um novo valor para o nível de ruído de fundo. O novo segmento a ser avaliado deve iniciar num ponto que corresponda a um decaimento de 5dB a 10dB após o ponto de cruzamento, ou um mínimo de 10% do tamanho total da IR.
8. Encontra-se um novo ponto de cruzamento entre o nível de ruído e a assíntota do decaimento.

Repetem-se os passo de 5 a 8 até o ponto de cruzamento convergir ou atingir-se o número máximo de iterações.

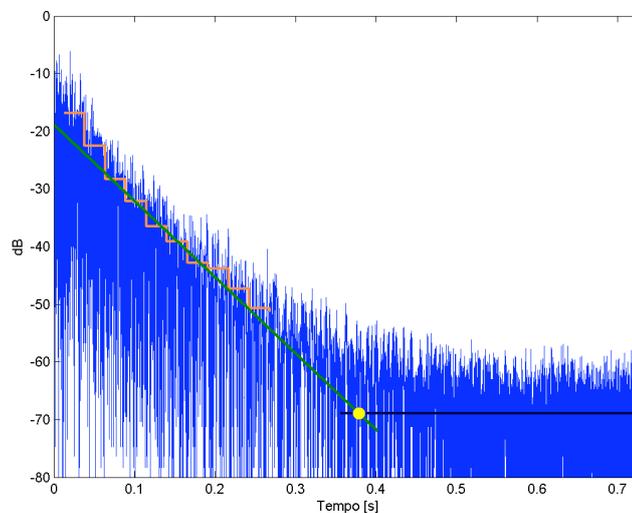


Figura 6: O método de Lundeby

1.4 Comparação entre Sinais de Excitação

O fator de crista (do inglês, *Crest Factor*) é definido como uma razão entre a tensão de pico e a tensão RMS de um sinal, geralmente expresso em dB. Sinais com fator de crista elevado devem ser evitados, uma vez que estes sinais apresentam picos elevados, que podem causar distorção do sinal.

Em primeira instância, um sinal MLS bipolar seria o sinal ideal no sentido de se extrair o máximo de energia de uma medição, já que apresenta um $FC=0\text{dB}$. Mas, o fator de crista das MLS's usadas na prática é sensivelmente maior que 0dB . Na placa de áudio, após o conversor D/A, o sinal passa por um filtro "anti-aliasing", que acaba por alterar a forma de onda da MLS. Verifica-se então a presença de picos no sinal de saída, o que degrada o fator de crista do sinal. Para evitar que estes picos sejam saturados, o sinal MLS deve ser enviado ao conversor D/A com nível entre 8dB e 5dB menor que o nível máximo do conversor. A figura 1.4-6 mostra as amostras iniciais de uma MLS após passar por um filtro "anti-aliasing". Verifica-se claramente a deformação do sinal e a presença de picos bastante pronunciados. Este sinal, que é o sinal efetivamente usado para a excitação de salas apresenta $FC=8.5\text{dB}$, valor consideravelmente maior que os teóricos 0dB da MLS.

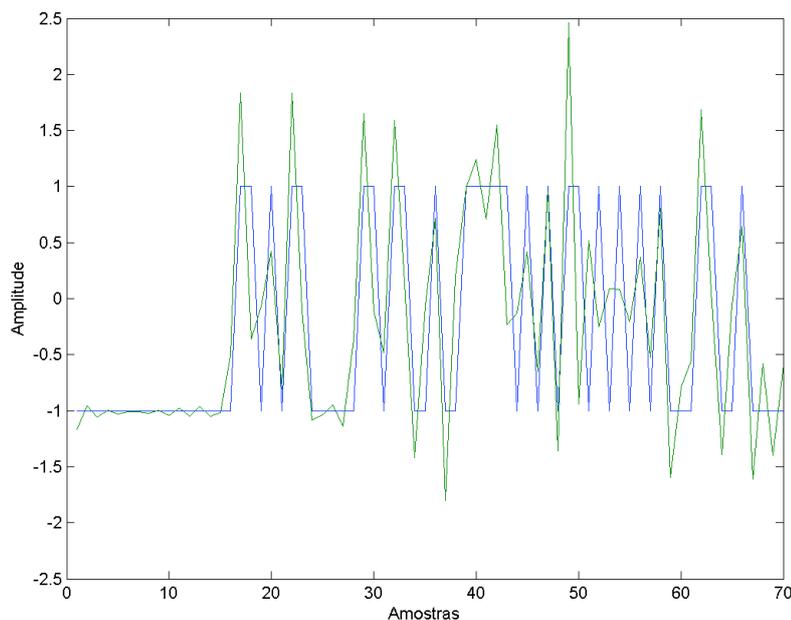


Figura 6: Sinal MLS original (azul) e o mesmo sinal após passar por um filtro "anti-aliasing" (verde)

A varredura de senóide apresenta um FC teórico de 3dB . Por este sinal conter energia apenas nas frequências de interesse, ele não será afetado pelos filtros da placa de áudio, e poderá na prática ser reproduzido com uma intensidade maior que uma MLS. Uma varredura utilizada para a excitação de salas (após passar pelo filtro "anti-aliasing") apresentava $FC=3.6\text{dB}$, valor bastante próximo do FC teórico.

Deve-se atentar que mesmo que o sinal seja reproduzido sem distorções pela placa de áudio, os alto-falantes geralmente possuem respostas não lineares, que tornam-se críticas para intensidade sonoras elevadas. Assim, mesmo com FC favorável, não é recomendável reproduzir sinais de excitação – seja MLS ou varredura – com volume muito elevado.

1.5 Comparação entre Métodos de Medida

Entre os métodos apresentados neste texto, aqueles baseados nos sinais de excitação MLS e varredura são os mais comumente usados, em razão das propriedades destes sinais apresentadas nas seções anteriores.

Ao excitar-se a sala com um impulso (1.1.1), pouca energia será fornecida à sala em teste, resultando numa SNR bastante desfavorável. Na tentativa de melhorar a SNR elevando a intensidade de reprodução do sinal, deve-se tomar cuidado para que o alto-falante não passe a trabalhar numa região de elevada não-linearidade. A realização de média temporal de várias excitações pode fornecer uma melhora considerável no SNR se o ruído presente no sinal for não-correlacionado. Neste caso, é necessário garantir que o período de repetição dos impulsos seja maior que o tempo de reverberação da sala a ser medida para evitar "aliasing". Na verdade, esta precaução deve ser

tomada com qualquer método de medida periódico, por exemplo o MLS, o que requer uma estimativa prévia da ordem do tempo de decaimento do sistema sendo medido.

O uso de senóides (1.1.2) oferece uma função de transferência bastante precisa para as frequências excitadas, mas de baixa resolução. Para obter-se uma resolução aceitável, este método tornaria-se excessivamente demorado.

O método TDS possui uma realização interessante, mas a construção de um filtro passa-faixa de frequência central variante no tempo é de difícil realização em software. Especialistas consideram este método obsoleto. Da mesma forma, as vantagens apresentadas pelo método MLS se tornaram obsoletas com o aumento da velocidade de processamento e capacidade de memória dos computadores atuais.

O uso da FFT (1.1.4) é provavelmente o método mais interessante nos dias de hoje. Sendo assim, cabe apenas selecionar o sinal de excitação mais adequado, ou seja, aquele que oferece a melhor SNR. De acordo com a teoria do fator de crista, os melhores sinais para esta aplicação seriam a varredura logarítmica e a MLS. Verificou-se que o método de excitação por varredura logarítmica com deconvolução via FFT – sugiro o nome “*Log-sweep FFT method*” (LSF) – mostra-se o método mais indicado para medição acústica de salas nos dias de hoje.

2. SISTEMA DE MEDIÇÃO

A arquitetura de um sistema de medição acústica, é geralmente constituída por dois módulos, como apresentado na figura 2-1. O primeiro módulo, responsável pela geração do sinal, obtenção da IR e cálculo dos parâmetros acústicos, é implementado por um microcomputador. O segundo módulo, responsável pela reprodução e aquisição de sinais sonoros, é implementado por uma placa de áudio e um conjunto de transdutores. Nestas etapas, pode-se dizer que o sinal pertence a um de três domínios distintos: o sinal acústico analógico, o sinal elétrico analógico e o sinal elétrico digital.

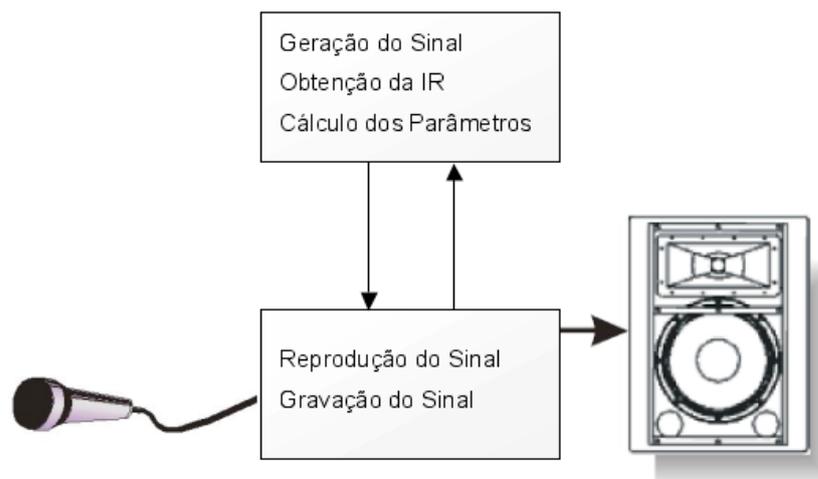


Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema de medição acústica

2.1 Reprodução e Aquisição de Áudio

Uma placa de áudio de boa qualidade é um requisito chave para a qualidade de reprodução e gravação dos sinais. Os requisitos básicos para que uma placa de áudio possa ser usada para medição acústica são:

1. apresentar linearidade e boa SNR;
2. trabalhar com taxas de amostragem superiores a 40kHz;
3. funcionar em modo “stereo full duplex” (produzir um sinal estéreo e gravar outro sinal estéreo simultaneamente).

Como transdutor de entrada recomenda-se usar um microfone de medição com resposta praticamente plana e omnidirecional. O mesmo vale para o transdutor de saída.

A IR de uma sala obtida por meio destes equipamentos contém não só a resposta da sala, mas também a resposta de todos os elementos deste sistema. Para obter uma medição o mais fiel possível, é necessário que os elementos deste sistema possuam função de transferência o mais

linear possível. Como esses elementos estão todos ligados em série, a qualidade do sistema é limitada pela resposta do elemento de qualidade mais baixa.

Caso o sinal esteja sendo reproduzido por uma fonte externa, como um CD-player, e sendo apenas gravado pela placa de áudio, é necessário atentar para o sincronismo entre estes dois equipamentos. Mesmo uma diferença mínima entre as frequências de amostragem acarreta uma diferença no número de amostras, o que para sinais como o MLS é inaceitável.

2.2 Geração e Tratamento do Sinal

A geração e, principalmente, o tratamento dos sinais usados para as medições acústicas, requer uma elevada taxa computacional. Portanto é recomendável o uso de um bom computador para acelerar a realização desses cálculos. Também, como se trata de arquivos de áudio não comprimidos, é necessária disponibilidade de memória física e memória RAM. Estes requisitos são facilmente atingidos pelos microcomputadores disponíveis atualmente no mercado.

2.2.1 Geração do Sinal

O primeiro passo para a realização da medição é a criação de um sinal de excitação para a sala. Os sinais recomendados para medição acústica são impulsos, varreduras e seqüências MLS.

Tanto varreduras senoidais quanto seqüências MLS podem ser geradas por algoritmos relativamente simples. As varreduras lineares ou logarítmicas são geralmente gerados no domínio do tempo, mas pode também ser gerada no domínio da frequência, como explicado em [5]. Para as seqüências MLS, além da seqüência MLS propriamente dita, a função deve também retornar os vetores de permutação de linha e coluna necessários para o uso da FHT, conforme especificado por Chu [10] e Cohn & Lempel [11].

Impulsos são gerados diretamente, criando um vetor nulo com apenas uma amostra de valor 1. Como já foi comentado, este sinal oferece uma SNR reduzida, mas ele é interessante para comparação do espectro de referência do sistema de medição. Se a IR obtida para qualquer um dos dois sinais anteriores for muito diferente da IR obtida pelo impulso, então o sistema pode conter algum tipo de não linearidade.

O sinal gerado de forma digital deve ser gravado num formato adequado para sua reprodução.

2.2.2 Recepção do Sinal

A placa de áudio e o sistema operacional do PC devem permitir a reprodução e aquisição simultânea de som. Um arquivo estéreo com a resposta da sala ao sinal de excitação em um canal e o sinal de referência (curto elétrico) no outro canal deve ser gerado. O sinal de referência é importante para a correção espectral (seção 1.2).

Na fase de aquisição do sinal, é importante que o aplicativo de aquisição avise caso ocorra saturação do sinal, ou seja, quando o nível do sinal está acima do nível máximo de amostragem do conversor A/D.

2.2.3 Deconvolução

De posse da resposta da sala ao sinal de excitação, é necessário deconvoluir o sinal, de forma a obter-se a IR.

As MLS devem ser deconvoluídas através da FHT. Conforme Peltonen [9], para a obtenção da IR via FHT, primeiro é necessário reordenar a seqüência de acordo com o vetor de permutação de coluna e depois adicionar uma nova amostra de valor nulo no início da seqüência, de forma que ela fique com comprimento 2^N (a FHT funciona apenas para seqüências de comprimento 2^N). Após o cálculo da FHT, descarta-se o primeiro elemento da seqüência. Então a seqüência é novamente reordenada, agora de acordo com o vetor de permutação de linhas, fornecendo assim a IR da sala.

Para a deconvolução via SLF, usá-se uma função FFT. Primeiramente obtém-se o espectro do sinal de excitação e do sinal de resposta. O espectro do sinal de resposta é então dividido pelo espectro do sinal de excitação, o que fornece a função de transferência da sala. A IR é obtida por meio da transformada inversa de Fourier (IFFT) da função de transferência. Este método para a obtenção da IR é bastante suscetível ao ruído. Existem diversos métodos de estimação espectral que tentam tornar esta operação mais confiável, mas que não foram tratados neste projeto.

Neste ponto, é possível realizar a compensação espectral mencionada na seção 1.2, dividindo-se a função de transferência obtida por um espectro de referência.

2.2.4 Tratamento da IR

Os parâmetros acústicos são usualmente calculados por faixas de frequência. Deve-se então filtrar a IR de banda larga por um banco de filtros de oitava ou terço-de-oitava.

Após a filtragem, ainda é necessário um tratamento da IR antes de se calcular os parâmetros acústicos. Este tratamento do sinal visa compensar os efeitos mencionados na seção 1.3 (atraso na chegada do sinal, decaimento possivelmente não exponencial e ruído de fundo). Foram desenvolvidas funções que implementam o método de Chu, o método de Hirata e o método de Lundeby (seção 1.3.3).

2.2.5 Cálculo dos Parâmetros Acústicos

Uma vez que o sinal já foi tratado, e já está filtrado na banda de interesse, resta então calcular os parâmetros acústicos detalhados na norma ISO 3382, entre eles: Tempo de Decaimento, Força Sonora, Clareza, Definição e Tempo Central.

3. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos membros do grupo de pesquisa AcMus, especialmente ao mestrando Fábio Leão e aos Profs. Drs. Fábio Kon, Marcelo Gomes de Queiroz e Flávio S. Correa da Silva. Agradecemos também ao Prof. Dr. Luiz Baccalá (PTC – EPU SP) pela grande ajuda no decorrer da pesquisa e ao Dr. Swen Müller (Inmetro) por ceder alguma das figuras utilizadas neste texto. Esta pesquisa tem apoio da FAPESP, proc. n.o 02/02678-0.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vorländer M., Bietz H. 1994. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. *Acustica* Vol. **80**. pp. 205–215.
- [2] ISO 3382:1997. Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [3] Burt, Phillip M. S. "Measuring Acoustic Responses with Maximum-Length Sequences". In *ITS Proceedings*, pp 284-289. Agosto 1998.
- [4] Heyser R. C. 1988. An anthology of the works of Richard C. Heyser on measurement, analysis and perception. AES Inc., New York 1988. 279p.
- [5] Müller, S., Massarani P., "Transfer Function Measurements with Sweeps". *J.AES*, Vol. 49, number 6, pp.443. 2001.
- [6] Vanderkooy, John. "Another Approach to Time Delay Spectrometry". *J.AES*, vol. 34, July 1986, pp.523-538.
- [7] Greiner, Richard; Wania, Jamsheed; Noejovich, Gerardo. "A Digital Approach to Time Delay Spectrometry". *J.AES*, vol.37, July 1989, pp593-602.
- [8] Chu W. T. "Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method". *J. Acoust. Soc. Am.* **63**(5), May 1978. pp. 1444–1450.
- [9] Hirata Y. "A Method of Eliminating Noise in Power Responses" *J. Sound Vib.* vol. **82** pp. 593–595. 1982.
- [10] Lundeby A., Vigran T.E., Bietz H., Vorländer M. 1995. Uncertainties of Measurements in Room Acoustics. *Acustica* Vol. **81** (1995). pp. 344–355.
- [11] Cohn, M. & Lempel, A. "On Fast M-Sequence Transforms". *IEEE Trans. Inf. Theory* IT-23 (1977) 135-137.