

MEDIÇÕES DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE SISTEMAS DE SONORIZAÇÃO

Swen Müller e Paulo Massarani
LAENA - INMETRO
Av. Nossa Senhora das Graças, 50, Xerém
CEP. 25.250-020 Duque de Caxias, RJ - Brasil
e-mail: smuller@inmetro.gov.br

Resumo - Nesse trabalho são comparados quatro métodos (TDS, MLS, análise de FFT de 2 canais, medição com varreduras) de medir respostas de sistemas lineares e invariantes no tempo (LTI). São abordadas a necessidade do uso de sinais com pré-ênfase adequada, a aplicação hábil de janelas e a realização de médias espaciais para obter resultados coerentes em medições de PAs.

Abstract - This paper compares four methods (TDS, MLS, 2-channel FFT analysis, sweep measurements) for measuring the frequency response of LTI-systems in general. For the measurement of PAs, the need to apply adequately pre-emphasized signals, the suitable application of windows and spatial averaging will be addressed.

I. INTRODUÇÃO

A reprodução de som em alta fidelidade ainda é raridade em muitos shows, embora o quadro tem mudado gradualmente devido a sistemas de sonorização cada vez mais sofisticados e graças à ampla disponibilidade de ferramentas de medição. Porém, o uso dessas ferramentas não é tão fácil quanto o de um simples multímetro ou medidor de SPL. A obtenção de resultados coerentes e a interpretação correta deles requerem alguns conhecimentos de acústica de salas e de processamento digital de sinais. Na primeira parte, esse artigo investigará de forma geral técnicas para obter respostas em frequência de qualquer sistema suficientemente linear e invariável no tempo. A investigação se restringe a métodos que permitem a aquisição das respostas complexas, isto é com amplitudes e fases das funções de transferência. Esses espectros trazem em si (no atraso de grupo que é derivada da fase) a informação da chegada de todos os componentes. Uma transformada inversa rápida de Fourier (IFFT) da função de transferência complexa revela a resposta impulsiva (RI), cujo tratamento com janelas possibilita a separação da informação útil de ruído e reflexões indesejadas. Esse assunto, além do de médias espaciais, será abordado na segunda parte.

II. QUATRO TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DE FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Em princípio, qualquer técnica para obter a função de transferência fornece um sinal de banda larga ao “device under test” (DUT, dispositivo a ser ensaiado) e analisa a resposta na saída.

A. Time Delay Spectrometry (TDS)

A TDS é um dos métodos mais antigos e o único que dispensa as FFTs para a obtenção de funções de transferência. Concebido por Richard Heyser nos anos 60 e comercializado pela Tecron em forma dos lendários analisadores TEF, um analisador TDS gera uma varredura linear, quer dizer a frequência aumenta com um incremento constante no tempo. Esse sinal alimenta o alto-falante, cuja resposta captada pelo microfone é *multiplicada* pelo sinal do gerador e ainda por uma versão defasada em 90°. Assim as partes real e imaginária da função de transferência complexa são obtidas.

A multiplicação gera a soma e a diferença das frequências dos dois sinais envolvidos. A soma equivale aproximadamente ao dobro da frequência do gerador. A partir de uma certa frequência da varredura, ela é rejeitada pelo filtro passa-baixa na saída. Já a diferença sempre tem uma frequência perto de 0 Hz e passa sem atenuação pelo filtro passa-baixa, contanto que a frequência do sinal captado seja próxima da do sinal gerado.

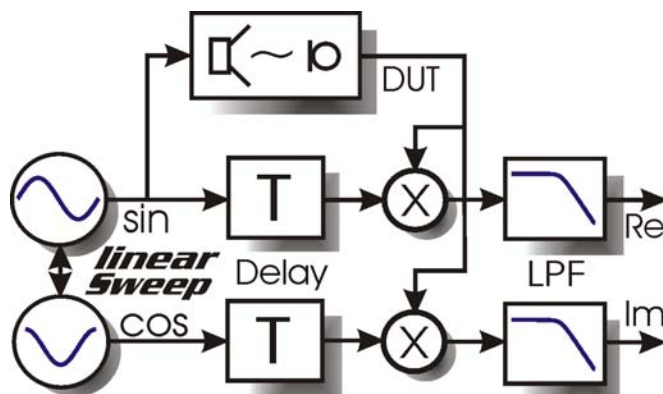


Figura 1: Diagrama de bloco de um analisador TDS.

Porém, devido ao tempo de propagação no ar, a resposta do alto-falante à varredura chega ao microfone com um atraso. Por isso a frequência dela é mais baixa do que a do gerador. Para compensar o tempo de propagação do som, componente crucial dos analisadores TDS é um bloco de retardo ajustável (“delay”, o que corresponde à segunda letra da sigla) que serve para atrasar o sinal do gerador antes de chegar ao multiplicador. Com o retardo propriamente ajustado, os dois sinais de entrada do multiplicador têm praticamente a mesma frequência, fazendo com que a diferença dos dois tenha frequência baixíssima que não sofre atenuação pelo passa-baixa final.

Reflexões percorrem um itinerário maior e por isso, ao chegar no microfone, a frequência instantânea delas é menor do que a do som direto. Graças a esse fato, a TDS é capaz de rechaçar reflexões: Quanto mais comprido é o percurso da reflexão, mais alta será a frequência da diferença e maior será a atenuação. Assim, o filtro passa-baixa tem um impacto parecido ao das janelas nos métodos que calculam RIs.

Para que esse efeito seja independente da frequência, a varredura tem que ser linear, assim garantindo que a diferença de frequência entre som direto e reflexão seja constante.

Já o uso de varreduras lineares, que têm espectro branco, é a maior desvantagem da técnica TDS. Como vale também para os MLS, um espectro branco não é adequado para medições acústicas porque o ruído de fundo tende a aumentar em baixas frequências enquanto que a resposta dos alto-falantes cai. Na prática, ou a varredura tem que ser esticada em muitos segundos, ou a medição tem que ser efetuada em duas faixas de frequências para alcançar uma relação sinal/ruído satisfatória abaixo de 100 Hz. Ambas as medidas estendem a duração de uma análise de TDS muito além do tempo requerido com métodos mais modernos.

O lado positivo: a TDS é menos sensível a distorções e variâncias no tempo do que métodos que empregam

ruído pseudo-aleatório (RPA).

Como a TDS calcula a função de transferência complexa, a RI é obtida com facilidade mediante uma IFFT.

Pro/contra da TDS:

- * Lento.
- * Baixa relação S/R em baixas frequências.
- * Requer ajuste de retardo.
- * Uso meio complicado e pouco transparente.
- * Ondulações na frequência inicial da varredura.
- ✓ Insensível a distorções.
- ✓ Insensível a variância no tempo.

B. Análise de FFT de 2 canais

Nos primórdios da época digital, analisadores de FFT de dois canais ainda foram empregados com frequência para medir funções de transferência. Com o surgimento de métodos mais rápidos baseados em aparelhagem mais barata e compacta, tais como TDS e MLS, as engenhocas pesadas da primeira geração passaram a ser encontrados cada vez menos em medições acústicas. Nos últimos anos, porém, observa-se um ressurgimento da técnica de análise de dois canais, agora à base de programas que rodam em PCs e fazem uso das placas de som para a aquisição dos sinais.

Em princípio, um analisador de FFT de 2 canais joga um sinal de banda larga para o DUT e divide o espectro na saída pelo na entrada.

O sinal de excitação tradicionalmente é ruído não-determinístico, gerado por uma fonte analógica ou um algoritmo que produz números aleatórios. Devido à natureza aleatória, o espectro do sinal de excitação não é conhecido em detalhe e por isso, tem que ser analisado junto com o sinal da saída, necessitando um segundo canal. Semelhante à TDS, o sinal do gerador tem que ser atrasado pelo tempo de propagação do som para garantir que trechos correspondentes do sinal contínuo sejam analisados.

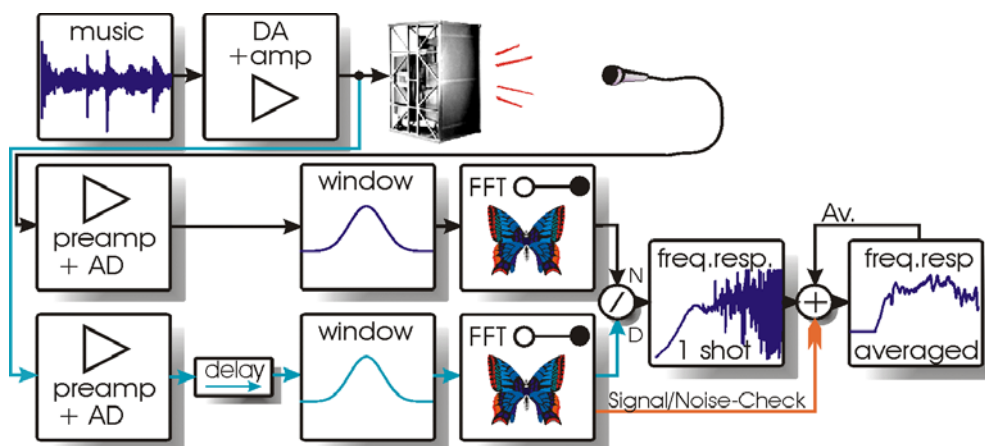


Figura 2: Análise de FFT de dois canais

Além disso, é imprescindível a aplicação de janelas para evitar efeitos de “leakage” (vazamento, ou seja, contaminação do espectro por descontinuidades nos limites do intervalo analisado). Isso é uma fonte de erro porque componentes do som com atrasos diferentes sofrem ponderações diferentes.

A maior desvantagem da análise de 2 canais, porém, é a morosidade da medição que se deve ao caráter errático do ruído aleatório. A longo prazo, o espectro dele tende a ter um espectro liso, mas a análise espectral de um intervalo curto revela inúmeras caídas íngremes e profundas. Nessas frequências, a relação S/R não é suficiente e a divisão pode produzir resultados arbitrários. Por isso, um analisador de FFT de dois canais tem que efetuar várias médias antes de poder apresentar uma curva confiável. Nessas médias, as frequências com relação S/R insuficiente devem ser desconsideradas.

Em vez do ruído do gerador, qualquer outro sinal de banda larga, até música, pode servir como estímulo. Isso constitui a grande vantagem da técnica de 2 canais: a possibilidade de medir um sistema de sonorização despercebidamente durante o show, utilizando o próprio sinal que está sendo sonorizado. Porém, com música, o prazo até a apresentação de resultados confiáveis aumenta ainda mais e pode se estender a alguns minutos.

Além disso, faz pouco sentido de avaliar a resposta do sistema de som a base de uma medição só. Como será mostrado no capítulo III, médias espaciais são imprescindíveis para obter resultados razoáveis. Sendo assim, operar um analisador de dois canais durante o evento não passa de ostentação de técnicos orgulhosos.

Pro/contra da análise de FFT de dois canais:

- ✓ Possibilidade de medições despercebidas.
- * Muito lento.
- * Baixa exatidão/confiabilidade.
- * Requer ajuste prévio de um retardo.
- * Requer dois canais.

C. MLS

Nos anos 80, com o advento do sistema MLSSA, o uso de MLS (Maximum Length Sequences) se popularizou na área de acústica. A rapidez inédita, a alta resolução espectral e um amplo conjunto de ferramentas para o pós-processamento eram razões para o sucesso.

A técnica de MLS contorna a grande desvantagem dos analisadores de dois canais e emprega um sinal de excitação determinístico. Uma MLS é uma forma especial de RPA que se destaca pela facilidade da geração (é uma seqüência binária de $2^N - 1$ valores que pode ser produzida em hardware com poucos CIs de TTL ou em software com poucas linhas de código) e pela rapidez da obtenção da RI mediante a

transformada rápida de Hadamard (FHT).

Repetido periodicamente, o espectro das MLS é perfeitamente branco, o que significa que normalmente não é necessário de fazer várias médias para obter um resultado confiável.

Porém, sempre tem problemas nas oitavas mas baixas. Na verdade, um espectro branco é pouco prestável em medições acústicas. O ruído ambiental quase sempre cresce consideravelmente em baixas frequências. Por isso, muitas vezes fica difícil com MLS de traçar o roll-off de alto-falantes abaixo da frequência de sintonização onde a resposta cai e o ruído aumenta.

Outro problema de ruído branco é que numa caixa de som, a maior parte da energia vai para o falante mais fraco, o tweeter. Na tentativa de obter uma relação S/R satisfatória, é freqüente que se aumenta o volume de tal forma que venha a queimar o tweeter.

Mais um aspecto negativo das MLS é o som desagradável e agressivo. Em medições de sistemas de som poderosos, até constitui um perigo: se a MLS for acidentalmente fornecida com um nível demasiado alto, pode trazer danos à audição de pessoas na proximidade das cornetas e até causar acidentes por causa do susto que as pessoas levam.

Para contornar todas essas dificuldades, é recomendável fornecer uma pré-ênfase nas baixas frequências da MLS [7]. No entanto, essa ênfase faz com que a MLS perca o caráter binário. Por isso, uma pré-filtragem digital não é factível em analisadores com gerador de MLS em hardware (tais como o próprio MLSSA) porque esses não dispõem de um conversor DA.

Quando uma MLS pré-enfatizada está sendo utilizada, a RI que a FHT revela a resposta do sistema a ser analisado convolvida com a do filtro de pré-ênfase. Com uma ênfase forte em baixas frequências, a RI do filtro tende a ser bastante larga. Isso pode restringir a aplicação de janelas ajustadas a fim de excluir reflexões em proximidade do som direto. Uma janela estreita pode provocar uma perda aparente de energia em baixas frequências.

Para desvencilhar-se desse problema, é melhor neutralizar a pré-ênfase antes do janelamento. O jeito mais rápido para realizar isso é a deconvolução no domínio espectral. A RI é submetida a uma FFT e o resultado é multiplicado pelo espectro de referência. Essa referência é obtida com facilidade numa medição prévia com a saída do sistema de medição conectada à entrada. O resultado dessa medição preparativa é invertido e vai neutralizar não somente a ênfase como também a resposta do próprio sistema de medição.

Após a multiplicação com a referência, uma IFFT revela de novo a RI, desta vez sem o espalhamento provocada pela ênfase. A janela pode agora ser colocada com mais tranqüilidade.

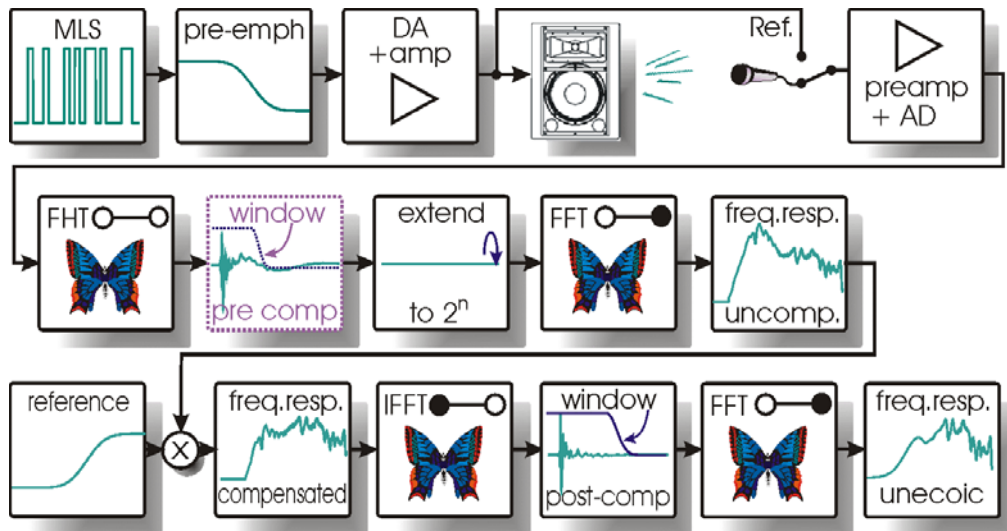


Figura 3: Processamento de sinais numa medição com MLS colorida e janelamento pré- ou pós-compensação

Se o que interessa é mesmo a função de transferência, mais uma FFT é necessária para obter o resultado final.

O processamento completo é então composto por uma FHT e três FFTs. Na verdade, o uso de uma MLS não traz vantagem nenhuma nesse procedimento. Qualquer sinal periódico com 2^N valores pode substituí-la. Nesse caso, a FHT (e a extensão da RI para 2^N samples mostrada na figura 3) é obsoleta, enquanto os outros passos de processamento não mudam.

A deconvolução completa é realizada mediante a multiplicação pelo espectro de referência. Esse passo opera a base de números complexos e por isso não somente corrige a amplitude como também a fase do sinal recebido. Em outras palavras, essa multiplicação é capaz de transformar qualquer sinal de excitação que passou pelo DUT na função de transferência genuína. Sendo assim, tem muito mais poder do que a FHT, que funciona somente com uma classe especial de sinais, as MLS, e é meramente capaz de corrigir as fases delas.

Uma vez liberando-se do grilhão MLS e FHT, não fica difícil construir qualquer sinal de excitação com densidade espectral desejada. O ponto inicial é a definição do espectro de amplitude. Em seguida, o ruído colorido condizente pode ser gerado facilmente jogando dados com as fases pertencentes e transformar o espectro para o domínio de tempo por uma IFFT.

No entanto, ruído (pseudo-) aleatório em geral (e MLS em particular) tem algumas propriedades indesejáveis. As medições a base delas são altamente suscetíveis a variâncias no tempo. Qualquer pequena mudança durante a medição traz como resultado um espectro encrespado. Contudo, o pior é a vulnerabilidade à distorção harmônica, que sempre está presente numa medição envolvendo alto-falantes. A intermodulação causada pelas não-linearidades se espelha pelo

intervalo da RI inteiro e reduz a faixa dinâmica alcançável.

Mas há remédio para esses impasses: A substituição do ruído aleatório pelas varreduras abordadas no próximo parágrafo.

Pro/contra das MLS:

- ✓ Rápido.
- ✓ Alta resolução/exatidão/confiabilidade.
- ✓ Geração fácil do estímulo.
- * Baixa relação S/R em baixas frequências.
- * Alta vulnerabilidade a variâncias no tempo.
- * Alta vulnerabilidade a não-linearidades.

D. Varreduras e FFT

Varreduras de senos (sweeps) comprovaram a ser os sinais de excitação mais adequados para qualquer tipo de medição acústica. O uso deles em conjunto com a deconvolução no domínio de frequências à base da técnica FFT traz algumas vantagens consideráveis:

1) Duração da medição

Ao invés de RPA, as varreduras podem ser empregadas de forma não-repetitiva. Em outras palavras, não é necessário emitir um período inteiro antes da própria aquisição de dados a fim de estabelecer um regime permanente. Porém, após o término da varredura, a gravação da resposta tem que continuar por um pequeno prazo para pegar toda a reverberação. Mesmo assim, uma medição com varredura normalmente demora pouco mais que a metade de uma medição com RPA, assumindo o mesmo comprimento dos dois sinais de excitação. Além disso, toda a energia emitida da varredura entra no resultado da medição.

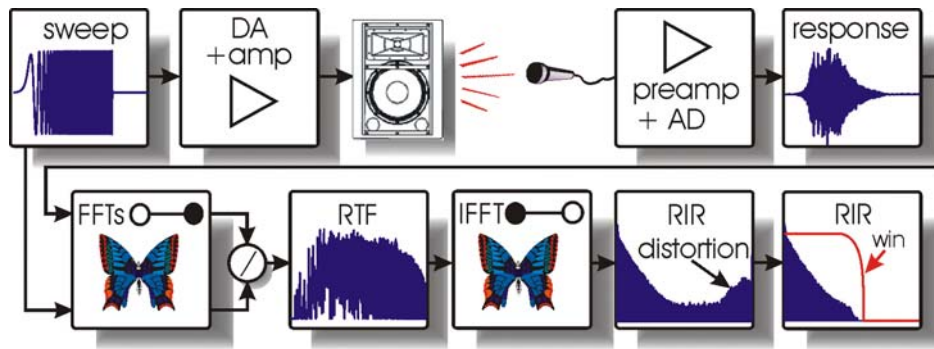


Figura 4: Medição genérica de uma resposta impulsiva de sala (RIR) com sweep e deconvolução circular. As distorções aparecem no fim do intervalo da IR e podem ser suprimidas facilmente com uma janela

2) Resistência total contra distorção harmônica

Medições com RPA são altamente suscetíveis a não-linearidades, basicamente introduzidas pelo alto-falante. Os artefatos que resultam das distorções se espalham pelo período inteiro da RI, assim elevando o ruído de fundo aparente. Essas distorções correlacionadas com o sinal de excitação de fato restringem a faixa dinâmica alcançável numa medição com RPA. Muitas vezes, é de fato necessário diminuir o volume para chegar a uma relação sinal/ruído melhor [10]. No entanto, abaixo de um certo nível, o verdadeiro ruído de fundo começa a prevalecer na RI calculada. Para então achar o nível ótimo, ensaios preliminares têm que ser efetuadas. Mesmo assim, a relação S/R dificilmente ultrapassa 70 dB numa medição com RPA, até sob condições favoráveis e ajuste cuidadoso do volume.

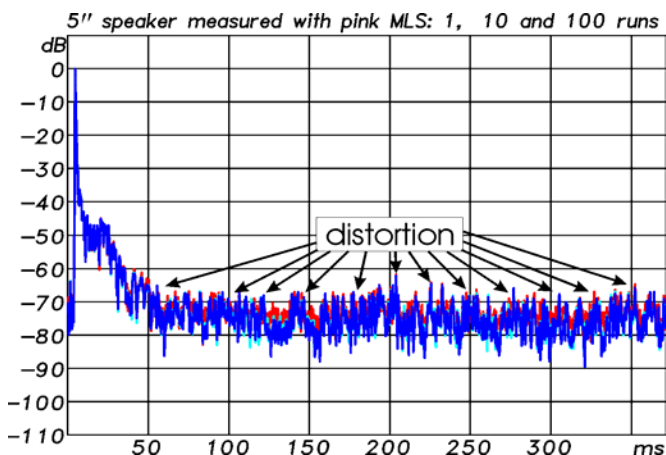


Figura 5: Medições de um pequeno alto-falante coaxial, utilizando uma MLS com ênfase "pink". O volume foi ajustado a render melhor S/R sem médias. Foram feitas nenhuma, 10 e 100 médias. A relação S/R não aumenta porque as intermodulações prevalecem.

Essa restrição não existe em medições com varreduras. Nelas, o cálculo da RI revela um acúmulo de energia em tempos negativos de chegada. São os produtos de distorção harmônica. Sendo causal, a atual RI do

equipamento a ser testado só pode residir em tempos positivos. Assim, fica fácil de separar os componentes espúrios da informação útil, ou seja, o joio do trigo.

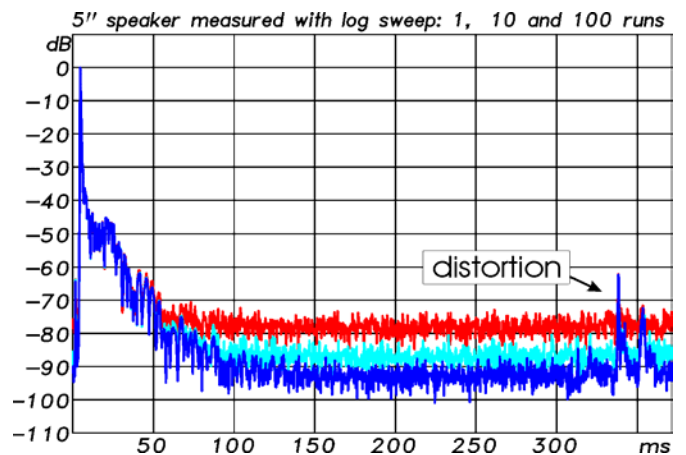


Figura 6: Medições do mesmo alto-falante, utilizando um sweep logarítmico (e deconvolução circular) com exatamente a mesma coloração e energia que a MLS na Figura 5. As distorções se concentram no fim do intervalo, onde podem ser excluídas com facilidade.

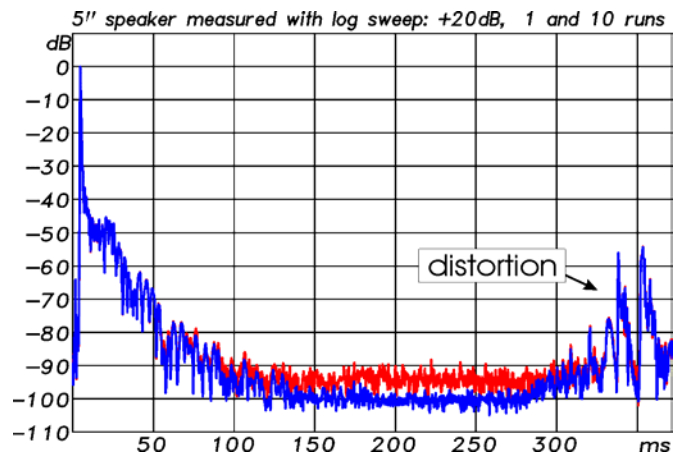


Figura 7: Enquanto um aumento do volume na medição com MLS iria piorar a relação S/R, há ainda muita reserva para o sweep: Aqui, o volume foi aumentado em 20 dB e a medição repetida com nenhuma e 10 médias. As distorções crescem bastante, mas a relação S/R aumenta.

Obtém-se um resultado limpo mesmo quando a medição for perturbada por distorção pesada. É, por exemplo, perfeitamente aceitável sobrecarregar o amplificador de potência. Aplicando-se uma janela adequada, os harmônicos causados pela ceifa do sinal serão excluídos completamente da medição.

Conseqüentemente, o usuário não tem de se esmerar com o ajuste do volume numa medição com varredura. Quanto mais volume, mais relação S/R dá, observando se, contudo, limitações de potência dos alto-falantes e de tolerância do pessoal presente no local.

Embora não seja o escopo desse artigo, vale mencionar que a utilização de uma varredura logarítmica até permite a classificação dos harmônicos individuais a fim de relacioná-los à fundamental. Isso proporciona uma medição rapidíssima da resposta em frequência e, simultaneamente, da distorção harmônica com alta resolução espectral.

3) Melhor Resistência contra variância no tempo

A vulnerabilidade à variância no tempo de medições utilizando RPA é um fato bastante conhecido e exaustivamente tratado em obras científicas [5], [11]. Qualquer irregularidade no tempo da chegada do som resulta em erros grosseiros na resposta calculada. Variância no tempo é um problema comum em medições no ar livre, causada por exemplo por lufadas de vento. Mas pode igualmente acontecer em qualquer medição se a própria resposta muda durante a aquisição de dados. Nesses casos, se o sinal de excitação for um RPA, a resposta em frequência demonstrará uma estrutura encrespada, particularmente em altas frequências. Esse efeito pode ser bastante perturbador quando ajustes com equalizadores estão sendo feito “on line” em medições repetitivas.

No entanto, utilizar uma varredura como sinal de excitação contorna esse problema. Fazendo um ajuste da resposta em frequência durante a captação da varredura ainda vai levar a um resultado intermediário com alguns erros, mas nem de longe tão graves quanto os que resultam da quebra de periodicidade quando RPA está sendo utilizado.

Pro/contra das varreduras com FFT:

- ✓ Rapidíssimo.
- ✓ Alta resolução/exatidão/confiabilidade.
- ✓ Altíssima relação S/R alcançável.
- ✓ Coloração arbitrária com baixo fator de crista.
- ✓ Perfeitamente imune contra distorção harmônica.
- ✓ Insensível a variância no tempo.

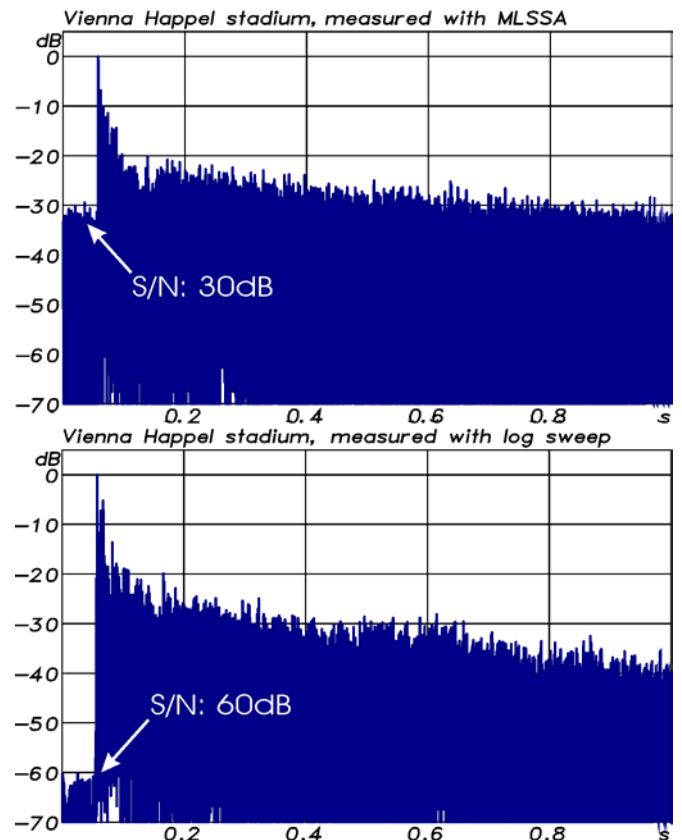


Figura 8: Comparação de medições com MLS e sweep logarítmico no estádio de futebol em Vienna num dia com vento forte. A duração das medições e o volume subjetivo eram aproximadamente iguais.

III. JANELAS E MÉDIAS ESPACIAIS

Alto-falantes são radiadores de som com uma diretividade complexa. O que de fato mais distingue um alto-falante de outro, além da resposta no eixo principal, é a maneira como a energia acústica se espalha em todas as direções. A medição da resposta de um empilhamento de caixas acústicas é mais intrincada do que a de um alto-falante individual. As fontes das caixas individuais interagem, fazendo com que haja interferência construtiva e destrutiva, resultando em coloração do som em função do lugar do ouvinte. O empilhamento de caixas convencionais é feito de tal maneira que na faixa dos médios e agudos, cada ouvinte recebe som de uma fonte só. Porém, é inevitável que haja algum grau de interferência entre duas áreas adjacentes de cobertura individual.

Por isso, para estimar uma resposta representativa do sistema, faz sentido efetuar uma média espacial da toda área de cobertura desejada. Em medições on-site, surge um problema: O das reflexões do chão, interferindo com o som direto, causando quedas e aumentos na função de transferência obtida. Para excluir o efeito da reflexão, é recomendável fazer as medições variando a altura do microfone (entre 1.40 e 2 m) e a distância ao

conjunto de caixas. Assim, o efeito “filtro pente” varia em frequência e tende a desaparecer na média energética final.

Outro aspecto é a supressão da reverberação e das reflexões de paredes. Em ambientes reverberantes, essas podem ter um impacto considerável sobre a função de transferência estimada. Num espectro de FFT, todos os componentes da RI contribuem de forma igual à amplitude, independentemente do tempo da chegada. No entanto, a nossa audição pondera o som direto mais forte do que as primeiras reflexões. Parece então razoável excluir as reflexões da RI, aplicando uma janela bem estreita.

Por outro lado, isso vai comprometer a resolução espectral em baixas frequências. Uma possibilidade para escapar desse impasse é utilizar janelas com larguras diferentes para avaliar a resposta em baixas e altas frequências. Porém, em locais espaçosos, muitas vezes nem existe a necessidade de aplicar uma janela tão estreita porque as paredes de onde vêm as primeiras reflexões se encontram bastante remotas. Ainda assim, sempre vale a pena cortar a reverberação difusa que, devido à absorção dependente da frequência, quase sempre traz uma coloração. É crucial tirá-la da RI para que os resultados da medição correspondam à impressão subjetiva do som.

O seguinte exemplo trata da medição num grande galpão, a “Arena” em Berlim que antes da queda do muro era uma oficina de locomotivas da companhia ferroviária da Alemanha oriental. A sonorização nesse lugar sempre foi uma tarefa difícil pois se trata de um ambiente bem reverberante. Por isso, foi empregado um line-array (“X-line” da Electro-Voice), aumentando a relação entre som direto e reverberação e garantindo uma homogeneidade melhorada, o que resulta num som agradável que não agride a audição.

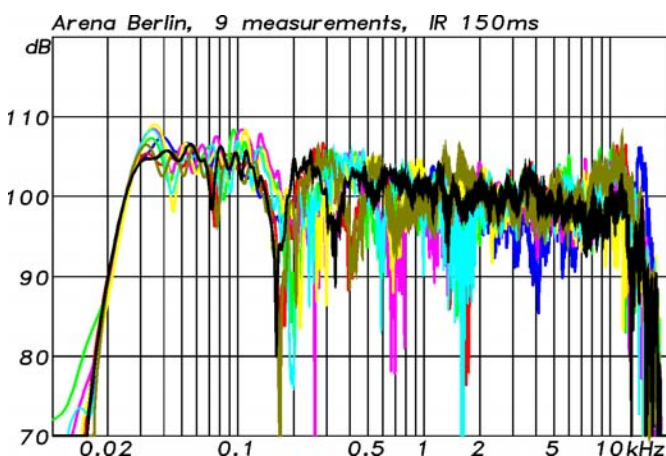


Figura 9: Funções de transferência de um empilhamento do line-array, medidas em nove pontos diferentes. As RI correspondentes foram confinadas a 150 ms.

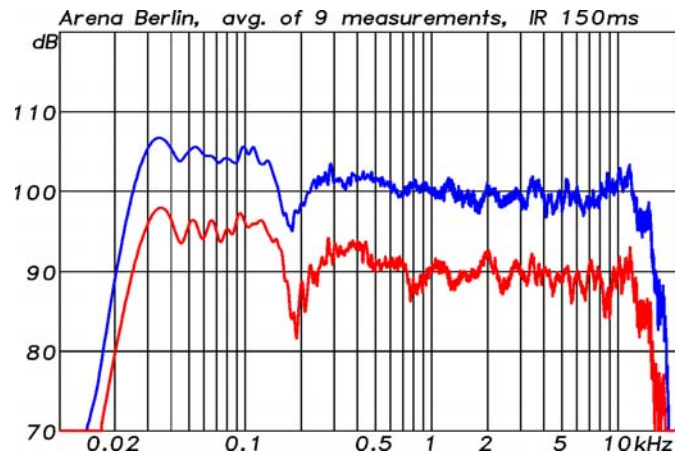


Figura 10: Média energética das nove respostas da Figura 9, e de outras nove respostas de outro empilhamento (com um deslocamento de 10 dB para manter clareza).

A Figura 9 mostra nove respostas em frequência medidas em pontos arbitrariamente escolhidas. As RIs a partir das quais calcularam-se os espectros foram submetidas a um janelamento que restringiu o comprimento delas a 150ms. Os espectros individuais demonstram quedas profundas e grandes diferenças entre si. Por isso, uma curva só não presta como estimativa. Já a média energética (que desconta da fase e por isso não sofre interferência) faz com que esses buracos sumam (Figura 10). A repetição da série de nove medições diante outro stack em outros nove pontos trouxe um resultado bem parecido. Isso mostra que uma média de apenas 9 pontos já traz resultados bastante confiáveis e repetíveis que podem servir como boa base para os ajustes finais.

As mesmas RIs tratadas com uma janela temporal que as limita a uma duração de apenas 15 ms resultem em espectros bem mais lisos, mas a resposta abaixo de 300 Hz fica prejudicada pelo efeito suavizador da janela. Abaixo de 100 Hz, a informação é completamente deturpada.

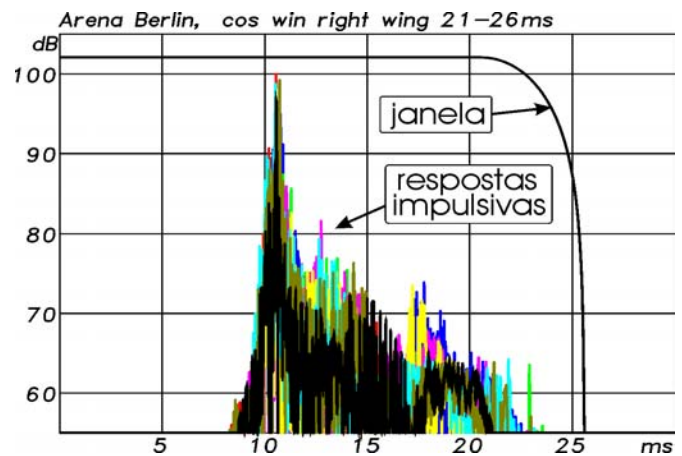


Figura 11: Supressão de reflexões e da reverberação nas respostas impulsivas com a ala direita de uma janela, colocada bem perto do som direto.

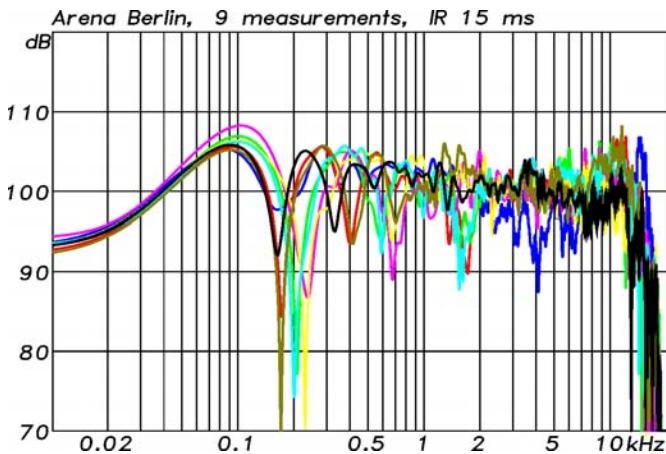


Figura 12: Funções de transferência que resultam do confinamento das RIs a 15 ms de duração.

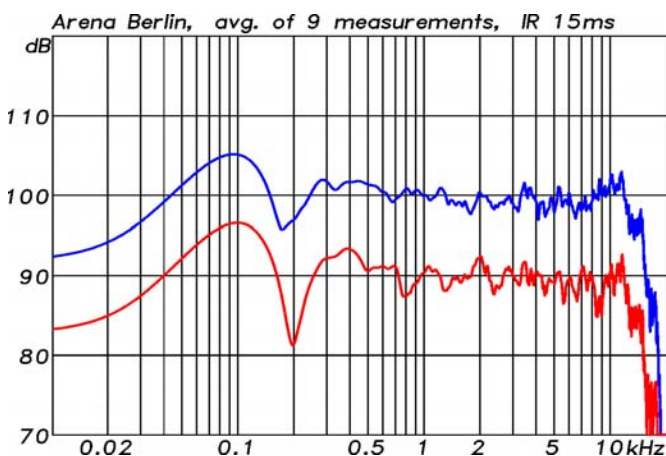


Figura 13: Média energética das nove respostas da Figura 12 e das outras nove respostas do outro empilhamento, todas agora com confinamento das RIs a 15 ms.

Porém, acima da faixa dos graves, os percursos das duas curvas (15 ms e 150 ms) se assemelham muito, o que mostra que nenhuma reflexão significativa se encontrou entre esses limites. Por isso, a separação em duas faixas de frequência com janelas diferentes não foi necessário nesse ensaio.

V. CONCLUSÕES

Varreduras são os sinais preferenciais para medições acústicas utilizando a deconvolução no domínio de espectro. Essa técnica alcança a maior faixa dinâmica no menor tempo de medição, é completamente imune contra distorção harmônica e bastante insensível a variações no tempo. Como ruído pseudo-aleatório, as varreduras também podem receber qualquer ênfase para melhorar a relação sinal/ruído em faixas críticas. Eles nem perdem o baixo fator de crista por causa da coloração, desde que o crescimento do atraso de grupo para qualquer frequência seja proporcional à energia nesta frequência.

Independentemente da técnica aplicada para medir a função de transferência, quando se trata da avaliação de um sistema de sonorização, é imprescindível janelar as respostas impulsivas para excluir reflexões de paredes e reverberação, e efetuar médias energéticas de vários pontos para neutralizar a interferência causada pela reflexão do chão para obter uma resposta representativa do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Douglas D. Rife e John Vanderkooy, "Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences", *J.AES*, vol. 37, pp.419-444, junho de 1989.
- [2] Swen Müller e Paulo Massarani, "Transfer-Function Measurement with Sweeps", *J.AES*, vol. 49, pp. 443-471, junho de 2001.
- [3] Angelo Farina, "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-sine Technique", *108th AES Convention*, Preprint 5093.
- [4] David Griesinger, "Beyond MLS – Occupied Hall Measurement with FFT Techniques", *101st AES convention*, preprint 4403.
- [5] John Vanderkooy, "Aspects of MLS measuring systems", *JAES*, vol. 42, p. 219, abril de 1994.
- [6] Eckard Mommertz e Swen Müller, "Measuring Impulse Responses with Preemphasized Pseudo Random Noise derived from Maximum Length Sequences", *Applied Acoustics*, vol.44, p. 195, 1995.
- [7] Michael Vorländer, "Application of Maximum Length Sequences in Acoustics", *17^o Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC)*, p. 35, dezembro de 1996.
- [8] A.J. Berkhout, D. de Vries, M. M. Boone, "A New Method to Acquire Impulse Responses in Concert Halls", *J.ASA*, p. 179, 1980.
- [9] Johan Schoukens, Rik Pintelon, Edwin van der Ouderna, Jean Renneboog, "Survey of Excitation Signals for FFT based Signal Analyzers", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, p. 342, setembro de 1988.
- [10] John S. Bradley, "Optimizing the Decay Range in Room Acoustics Measurements using Maximum-Length-Sequence Techniques", *J.AES*, vol. 44, pp. 266-273, abril de 1996.
- [11] Peter Svensson, Johan L. Nielsen, "Errors in MLS Measurements Caused by Time Variance in Acoustic Systems", *J.AES*, vol. 47, pp. 907-927, novembro de 1999.