

# Método para Avaliação Acústica de Salas Baseado em TSP

Gustavo Paulinelli Guimarães<sup>a</sup>, Christian G. Herrera<sup>a</sup>, Eduardo Bauzer Medeiros<sup>b</sup> e Hani C. Yehia<sup>c</sup>

UFMG - <sup>a</sup>Programa Graduação em Engenharia Elétrica

UFMG - <sup>b</sup>DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

UFMG - <sup>c</sup>DELTA - Departamento de Engenharia Eletrônica

CEFALA - Centro de Estudos da Fala Acústica Linguagem e Música

Av. Antônio Carlos 6627, Campus Pampulha

CEP 31270-901 Belo Horizonte-MG - Brasil

paulinel@terra.com.br , triball@brfree.com.br , bauzer@vesper.demec.ufmg.br , hani@cpdee.ufmg.br

**Resumo** - Este trabalho aborda o problema de avaliação de auditórios por meio de uma seqüência de medidas objetivas. O sinal de excitação empregado no experimento foi gerado por técnicas de processamento digital de sinais com o objetivo de tentar obter uma excitação mais adequada do ambiente. A técnica é baseada em TSP (Time Stretched Pulse) e foi usada para avaliar a resposta de um auditório típico. Antes dos testes, a fonte de excitação foi caracterizada em condições de campo quasi-não-reverberante. Os principais resultados para o caso de um auditório típico serão apresentados em conjunto com uma discussão sobre o procedimento dos testes e uma avaliação comparativa utilizando outro sinal de excitação: o ruído rosa.

**Abstract** - The present work addresses the problem of auditorium evaluation by means of a sequence of objective measurements. The excitation employed in the experiments has been generated by digital signal processing techniques with the objective of trying to obtain more adequate excitation of the auditoriums. TSP (Time Stretched Pulse) techniques have been employed to evaluate a typical auditorium's response. Prior to testing, the sound source has also been characterised in quasi non reverberant field conditions. The main results for a typical auditorium are presented together with a discussion of the testing procedure and a comparative using another excitation: the pink noise.

## I. INTRODUÇÃO

A escolha e quantificação dos parâmetros acústicos de auditórios são, possivelmente, as tarefas mais difíceis para um engenheiro acústico. Não só pelos processos físicos envolvidos, mas também pela associação de parâmetros objetivos a uma avaliação subjetiva de um ouvinte qualificado, como um músico. Há tempos atrás, alguns atributos já eram conhecidos [1], mas somente depois do pioneiro trabalho de Sabine, vários séculos depois, a base da relação entre parâmetros objetivos e avaliações subjetivas se estabeleceram. A estimação do tempo de reverberação representa a linha de pensamento que rege todos os primeiros trabalhos, juntamente com os parâmetros de *loudness* e claridade, aparecendo algumas vezes. Pesquisas recentes [1,2] mostraram uma riqueza de detalhes e

avaliações objetivas que podem tornar-se regras em futuras análises.

Avaliações objetivas demandam técnicas de medição adequadas. O atual desenvolvimento do processamento digital de sinais e da instrumentação podem constituir numa ferramenta eficiente para a avaliação de parâmetros objetivos.

## II. TSP ( TIME STRETCHED PULSE )

O TSP é definido como:

$$H(k) = \begin{cases} \exp(j4\pi Mk^2 / N^2) & \text{para } 0 \leq k \leq N/2 \\ H(N-k) & \text{para } N/2 \leq k \leq N \end{cases} \quad (01)$$

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \arg[H(k)] = \frac{N}{2\pi} \frac{\partial}{\partial k} \arg[H(k)] = \frac{4Mk}{N} \quad (02)$$

onde:

N - o número de pontos do TSP.

M - é um número inteiro e representa o "alongamento" do mesmo no tempo.

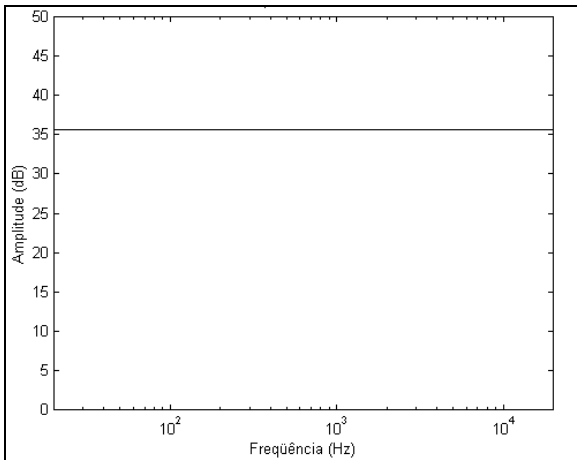
k - valores definidos em freqüência.

O TSP é um pulso "estendido" no tempo, cuja amplitude do espectro é plana (figura 01), assim como no ruído branco e no impulso. A diferença é que o espectro de fase tem uma forma quadrática, enquanto o ruído branco tem fase aleatória e o impulso tem fase linear.

O espectro do grupo de atraso do TSP é definido como a derivada da fase em relação à freqüência (Eq. 02) e diz que cada freqüência parte com um atraso que varia linearmente. A sensação que se cria é uma varredura de todas as freqüências entre 20Hz e 20kHz num pequeno intervalo de tempo.

Pode-se entender o TSP como um filtro FIR (Finite Impulse Response), pois cria-se um pulso no tempo a partir da transformada inversa de Fourier (IDFT) de uma resposta pré-definida no domínio da freqüência. Neste caso, resposta plana de 20 Hz a 20 kHz.

O TSP utilizado no experimento tem 340 ms de duração com uma taxa de amostragem de 44100 amostras por segundo.

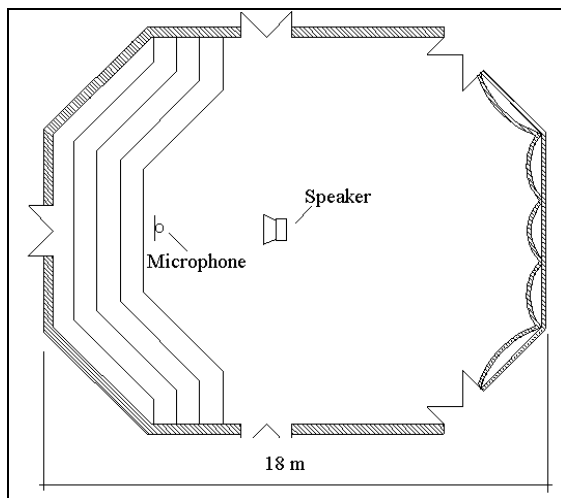


**Figura 01 : Espectro de frequência do TSP**

### III. METODOLOGIA

O Auditório da Escola de Música da UFMG foi escolhido para ser analisado pelo seu multiuso (fala e música) e pela praticidade de localização. Os testes consistiram da aplicação do sinal de teste (TSP) [3,4] através de uma caixa acústica, da captação do som por um microfone de medição e gravação em mídia digital. A vantagem deste procedimento é prover uma avaliação relativamente rápida da resposta do auditório, garantindo a repetibilidade do teste.

A Figura 02 mostra um diagrama simplificado do auditório para uma condição típica de teste.



**Figura 02 : O auditório testado**

Cada pulso foi gerado computacionalmente e gravado em CD, promovendo um sinal de excitação consistente para todas as condições de teste. A resposta foi gravada em mídia digital. No processamento digital, realizou-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) dos sinais gravados para se determinar o espectro de frequências dos mesmos.

### IV. PROCEDIMENTOS DE TESTE

Os testes consistiram das seguintes etapas:

- Geração e gravação dos sinais de teste em CD;
- Caracterização da Fonte Sonora;
- Teste no Auditório;
- Processamento dos sinais e análise.

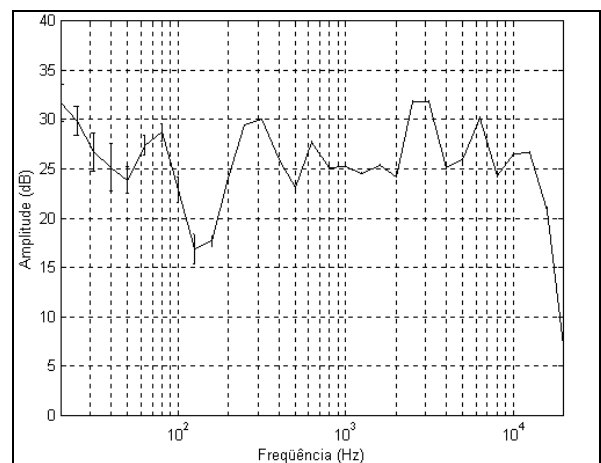
Os sinais foram gerados no software MATLAB, convertidos para formato “wave” e gravados em CD de áudio.

Antes de serem realizados os testes no auditório é necessário caracterizar a fonte sonora a ser utilizada. A fonte sonora, juntamente com todo o equipamento foi levado a um imenso campo gramado e as medições aconteceram nas primeiras horas da madrugada, a fim de obter baixos níveis de ruído de fundo e reverberação (condição de campo *quasi-não-reverberante*). As distâncias das medições foram as mesmas utilizadas dentro do auditório. Assim como no teste do auditório, a calibração foi realizada baseada no valor de 85,5 dB SPL, correspondendo a - 3 dB no gravador DAT.

Para o teste do auditório um procedimento similar foi utilizado. As medições foram realizadas como mostrado na Figura 02, com a caixa acústica na mesma altura do microfone (1,80 m) e a distância horizontal entre os mesmos de 5 metros.

### V. RESULTADOS

As figuras 03, 04 e 05 mostram, respectivamente, a resposta da caixa acústica, a resposta do auditório combinada à da caixa acústica e a resposta do auditório corrigida. Todas são apresentadas em 1/3 de oitava, com as linhas verticais representado o desvio padrão em cada banda de frequência.



**Figura 03 : Resposta em frequência da caixa acústica**

Os resultados foram obtidos a partir da análise dos sinais gravados obedecendo uma relação sinal ruído de no mínimo 20 dB para truncamento dos arquivos de áudio.

Os sinais foram gravados em extensões .WAV, obtendo-se o espectro de frequência através da FFT. A resposta do auditório foi determinada extraindo-se do espectro de frequência do sinal gravado no auditório, a resposta em

freqüência da caixa acústica.

Os resultados mostrados correspondem à média de cinco gravações consecutivas do mesmo TSP, observando o tempo de atenuação de cada pulso.

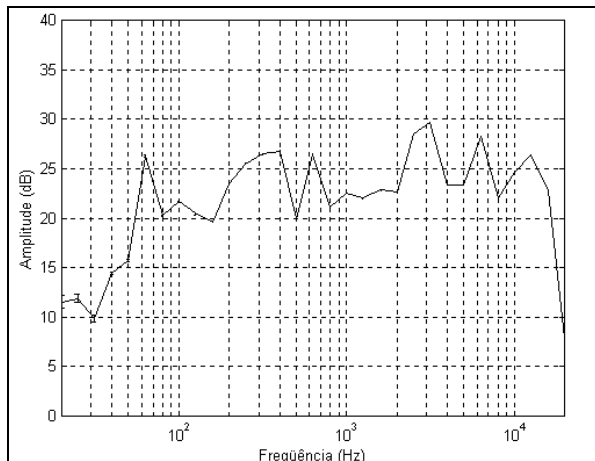


Figura 04 : Resposta da caixa acústica + auditório

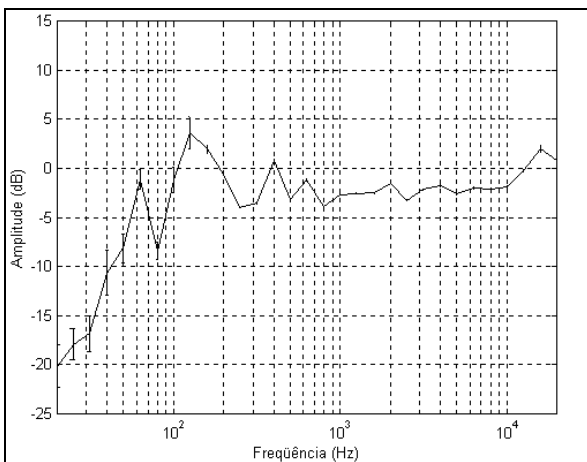


Figura 05 : Resposta do auditório corrigida

Para realização de uma análise comparativa os mesmos testes foram realizados utilizando outro sinal de teste: o ruído rosa, levando-se em consideração o fato de o ruído rosa ter um espectro como mostra a figura 06.

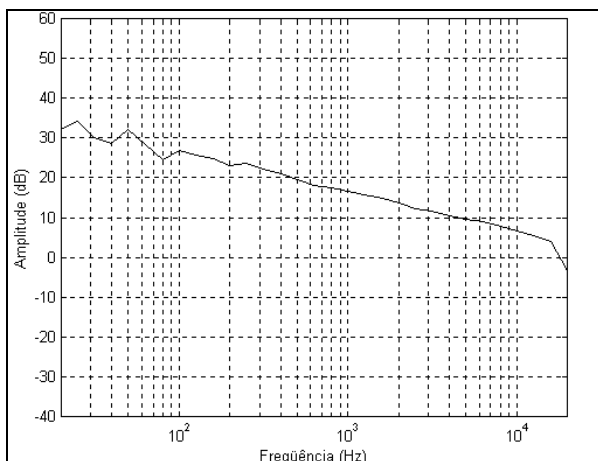


Figura 06 : Espectro do ruído rosa

A resposta do auditório corrigida é obtida, agora, extraindo-se, do sinal gravado no auditório, a resposta da caixa e o espectro do ruído rosa. O resultado é mostrado na figura 07.

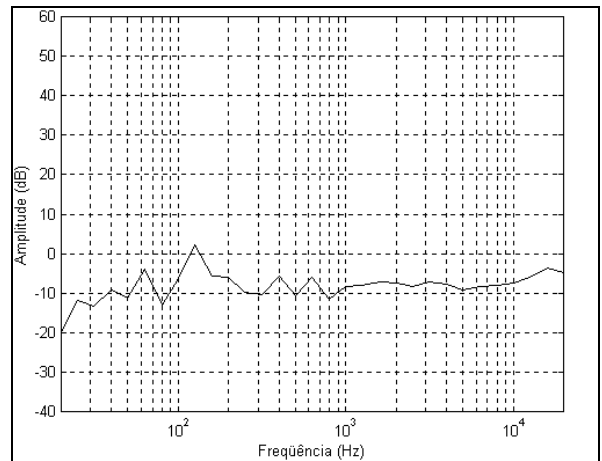


Figura 07 : Resposta do auditório corrigida usando ruído rosa

O ruído de fundo no teste em campo aberto é mostrado na figura 08. Para a gravação em campo aberto, a relação sinal-ruído foi de 27,5 dB e para a gravação no auditório, a relação sinal-ruído foi de 45,8 dB.

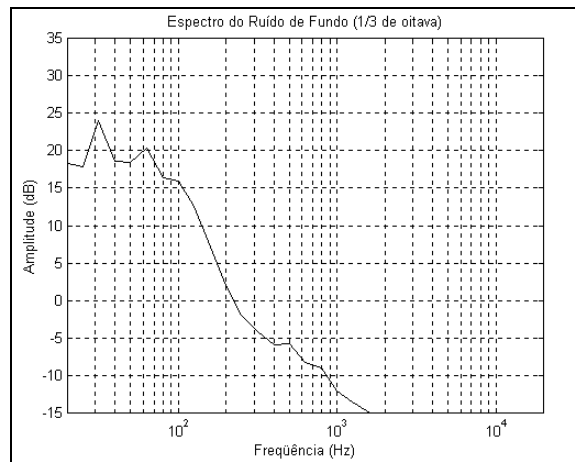


Figura 08 : Espectro do ruído de fundo

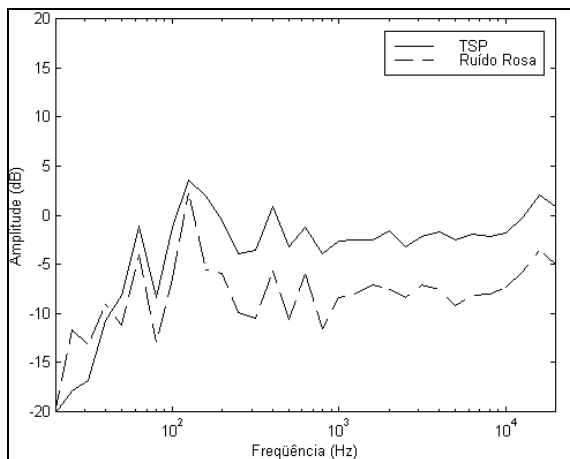
## VI. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

As respostas do auditório são apresentadas de uma maneira comparativa na figura 09. A figura 10 mostra a diferença dos espectros utilizando o TSP e o ruído rosa. Essa diferença foi obtida após normalização dos mesmos.

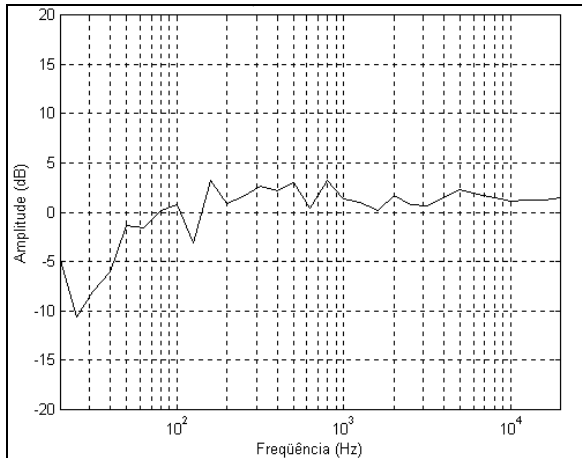
A partir de 100 Hz a diferença é de +- 3 dB. Abaixo de 100 Hz a diferença aumenta para +- 10 dB. Esse aumento se deve ao ruído de fundo (figura 08), que assume valores bastante consideráveis nessa faixa de frequência.

Esse fenômeno é notado também no desvio padrão de +- 3 dB (figura 03) da resposta da caixa acústica com TSP, que vai diminuindo com o aumento da frequência.

A resposta utilizando o TSP se mostrou semelhante à do ruído rosa, em sua forma. Pode se observar os picos em 125, 315, 630 e 16000 Hz.



**Figura 09 : Comparativo entre a resposta do auditório utilizando TSP e ruído rosa**



**Figura 10 : Diferença entre os espectros usando TSP e ruído rosa**

A caracterização da fonte se apresenta como o ponto mais crítico do processo, uma vez que a entrada de ruído se deu nessa etapa devido a baixa relação sinal-ruído conseguida.

## VII. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Escola de Música da UFMG pelo suporte oferecido. Eles gostariam de agradecer, também, ao comitê organizador do SemEA.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. L. Beranek, *Concert and Opera Halls: How they sound*, ASA, (1996).
- [2] T. Hidaka and L. L. Beranek, *Journal of the Acoustic Society of America*, 107, 368-383, (2000).
- [3] Y Suzuki et al., *Journal of the Acoustic Society of America*, 97, 1119-1123, (1995).

[4] N. Aoshima, *Journal of the Acoustic Society of America*, 69, 1484-1488, (1981).

[5] A. Oppenheim, A. Willsky, I. Young, *Signals and Systems*, Prentice-Hall, 1983.