



## ADIÇÃO DE REVERBERAÇÃO A RESPOSTAS DE SALAS OBTIDAS EM MODELOS REDUZIDOS

**José Flávio Feiteira**  
UNESA e COPPE/UFRJ

**Moysés Zindeluk**  
COPPE/UFRJ

**José Bismark de Medeiros**  
COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Mecânica  
Laboratório de Acústica e Vibrações – C.P. 68503 – 21945-170 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
feiteira@ufrj.br

**Resumo.** *Para que se possa obter uma avaliação prévia do comportamento acústico de uma sala, é conveniente construir um modelo em escala reduzida. A análise de respostas impulsivas entre pontos de emissão (fonte sonora) e recepção (microfone) na maquete permite prever a distribuição da pressão sonora, os tempos de reverberação e a ocorrência de ecos, incluindo efeitos de difração, focalização e outros de difícil modelagem computacional.*

*Por ser limitado em termos de relação sinal/ruído e de resposta em frequência, dificilmente um sinal impulsivo medido em uma maquete poderá ser utilizado, de imediato, para fins de auralização. É necessário que se efetue algum pós-processamento para se superarem as limitações.*

*Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um procedimento computacional que, a partir da envoltória tempo-frequência de uma resposta impulsiva obtida experimentalmente em modelo reduzido, sintetiza o trecho reverberante de alta frequência ausente na resposta experimental.*

**Palavras-chave:** *acústica de salas, modelos reduzidos, análise tempo-frequência, resposta impulsiva, processamento de sinais.*

### 1. INTRODUÇÃO

Características acústicas de salas podem ser alteradas com modificações geométricas e uso de reflexão, difusão e absorção. Na maioria das situações a “grande geometria” é dada, sendo necessária uma avaliação dos tratamentos acústicos. Em alta frequência, com a hipótese de campo difuso, fórmulas aproximadas fornecem estimativas razoáveis para o comportamento da sala. Em frequências baixas e médias a modelagem computacional é bastante complexa, requerendo um procedimento específico para a faixa de resposta modal e a inclusão do espalhamento e da difração para um bom desempenho do modelo na banda média.

Apesar dos grandes progressos da modelagem computacional aplicada na avaliação da qualidade acústica de salas, a utilização de maquetes continua sendo uma ferramenta valiosa por sua

alta fidelidade aos efeitos físicos mencionados. Um novo estímulo à utilização de modelos reduzidos de construções complexas, tornando-a novamente uma técnica promissora, tem sido a rápida evolução dos sistemas de aquisição e processamento de sinais.

A técnica consiste inicialmente na reprodução do ambiente real em escala geométrica reduzida de 1:  $n$  (redução por  $n$  das dimensões), o que significa uma ampliação por  $n$  das frequências consideradas no modelo. O nível de detalhamento é limitado pelas frequências consideradas. Efeitos de área ( $n^2$ ) e volume ( $n^3$ ) devem ser cuidadosamente examinados, pois podem escapar a essa ampliação de frequência. Além da semelhança geométrica, é necessário que os materiais aplicados para compor o interior da maquete tenham propriedades acústicas de absorção semelhantes aos materiais a serem aplicados no ambiente real, nas frequências escalonadas correspondentes. Vide Feiteira et al (2000).

## 2. LIMITAÇÕES TÉCNICAS

Muitas das dificuldades que se têm de enfrentar na utilização de respostas impulsivas medidas em maquetes estão relacionadas aos equipamentos de medição: geradores de sinais, amplificadores, filtros e, principalmente, os transdutores empregados, por serem limitados em termos de relação sinal/ruído e de resposta em frequência. O problema da limitação de banda dos transdutores é agravado pela transposição de frequência relacionada à mudança de escala.

O limite da frequência superior da banda é, geralmente, imposto pela resposta do alto-falante. Vide Feiteira et al (1998). Este valor, no estágio atual da tecnologia de áudio, está em torno de 20 kHz, o que corresponde, para um modelo em escala 1:20, à frequência de 1kHz, valor baixo para fins de simulação. Para salas grandes, o custo de uma maquete com escala maior que 1:16 pode ser proibitivo. Por outro lado, a extensão para altas frequências exige o uso de transdutores de ultrassom e secagem do ar, para manter a semelhança na atenuação por propagação.

Para que o efeito de auralização seja convincente é necessário que a largura de banda vá até 10 kHz, no mínimo. Vale lembrar que a ausência das altas frequências dificulta a análise subjetiva até mesmo das baixas frequências. No entanto, em avaliações subjetivas, não se está sempre interessado na precisão da informação contida nas altas frequências, podendo ser satisfatória sua simples presença, com razoável aproximação do campo acústico real.

## 3. ANÁLISE DE SINAIS NÃO-ESTACIONÁRIOS

No cálculo da resposta de sistemas lineares, técnicas tradicionais de análise espectral baseadas na transformada de Fourier ou em filtragem digital fornecem uma boa descrição de sinais estacionários ou pseudo-estacionários. Infelizmente estas técnicas possuem limitações quando os sinais a serem analisados são transientes – caso das respostas impulsivas – ou de elevada não-estacionariedade, isto é, sinais cujas propriedades espectrais variam no tempo. Quer se trate de um transiente determinístico ou de um sinal não-estacionário aleatório, a representação do mesmo em um único domínio, embora contenha toda a informação, não é suficientemente analítica podendo induzir a interpretações erradas e a perdas de importantes propriedades do sistema, levando o analista a conclusões inadequadas. Vide Fig. (3), parte superior. Para diminuir as limitações da representação em um só domínio, têm-se devotado esforços ao desenvolvimento de representações bidimensionais no domínio conjunto tempo-frequência, Massarani et al (1996).

Genericamente, uma Representação Tempo-Frequência (denominada também de Distribuição Tempo-Frequência) é uma função que define uma transformação de um sinal ou de um espectro para uma superfície bidimensional descrevendo a variação desse sinal no tempo-frequência. Existem infinitas possibilidades para se definir a função, dependendo da grandeza que se pretenda representar, mas, de um modo geral, uma Distribuição Tempo-Frequência pode representar uma grandeza de forma linear, com amplitude e fase, ou quadrática, como a energia. Alguns dos

exemplos mais conhecidos de representações tempo-freqüência lineares são a Transformada de Fourier de Janela Deslizante (TFJD), a Transformada Wavelet (TW), a Representação de Gabor e o Espectro Evolucionário. A TFJD da Resposta Impulsiva de uma sala de concertos é apresentada na Fig. (2).

Neste trabalho, para a análise das respostas impulsivas, optou-se pela versão discreta da TW, a TWD, por ser este um operador que decompõe o sinal em bandas de largura percentual constantes de freqüência, equivalente à análise em oitavas, muito utilizada em Acústica.

#### 4. MODELO TEMPO-FREQÜÊNCIA DA REVERBERAÇÃO DE SALAS

Um modelo estocástico de resposta acústica de salas, no domínio da freqüência, foi apresentado por Schroeder em 1954 e, mais recentemente, um outro modelo, no domínio do tempo, foi desenvolvido por Polack (Schroeder, 1987; Polack, 1988 e Polack, 1993).

Os modelos estatísticos ocupam posição importante em auralização e na sintetização de reverberação, porque através deles é possível se substituir a parte final da resposta impulsiva de uma sala por um sinal com “decaimento exponencial aleatório”. Conseqüentemente, um sistema de reverberação artificial pode ser controlado através de uma representação simples em termos de uma envoltória tempo-freqüência caracterizada pelo espectro inicial  $P(f)$  e pela taxa de decaimento da reverberação em função da freqüência  $TR(f)$ , sem necessariamente se basear em respostas impulsivas medidas ou calculadas. Para se conseguir a validação de um modelo estatístico e simular a reverberação de uma sala real, é necessário que se desenvolva um procedimento de análise preciso que permita que se estimem as características de decaimento a partir de uma resposta impulsiva medida, com alta resolução no domínio da freqüência e imunidade suficiente ao ruído da medição.

Na resposta impulsiva de uma sala, a densidade modal  $D_m$  (número médio de modos por Hz) é proporcional ao quadrado da freqüência  $f$ , e a densidade de ecos  $D_e$  (número médio de reflexões por segundo) é, aproximadamente, proporcional ao quadrado do tempo  $t$ :

$$D_e(t) = 4\pi c^3 \frac{t^2}{V} \quad (1)$$

$$D_m(f) = 4\pi V \frac{f^2}{c^3}, \quad (2)$$

onde  $c$  (em m/s) é a velocidade do som, e  $V$  (em m<sup>3</sup>) o volume da sala.

Essas expressões são facilmente demonstradas para salas retangulares e podem ser generalizadas para salas de quaisquer geometria, (Kuttruff, 1979 e Cremer et al, 1982). Para valores elevados de  $t$  e  $f$ , ambas as densidades tornam-se também muito elevadas. Esses valores altos de densidade são a base dos modelos estatísticos para resposta acústica de salas, como os desenvolvidos por Schroeder e por Polack, nos domínios da freqüência e do tempo, respectivamente. O modelo tempo-freqüência resultante é válido para descrever a reverberação de uma sala – parcela relativa à parte final da resposta impulsiva – se consideradas freqüências acima da denominada “freqüência de Schroeder”, fundamentando as técnicas de reverberação artificial, Schroeder (1962).

#### 4.1 MODELO ESTATÍSTICO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.

A equação (1) indica que, para altos valores de  $f$ , os modos normais de uma sala se sobrepõem no domínio da frequência, isto é, a separação média entre as frequências naturais é menor que um terço de  $\Delta f$  – a largura de banda de um modo. A largura de banda é definida para uma atenuação de 3 dB por :

$$\Delta f = \frac{\delta}{\pi} = \frac{2.2}{T_r} \quad (3)$$

onde  $\delta$  é o expoente de amortecimento do modo, relacionado ao tempo de reverberação  $T_r$  por:

$$20 \log_{10}(e^{-\delta T_r}) = -60 \text{ (dB)} \quad \Rightarrow \quad T_r = \frac{3 \ln(10)}{\delta} \quad (4)$$

Assim, nas frequências altas, qualquer fonte excitará simultaneamente muitos modos da sala. Considerando-se uma excitação harmônica (tom puro) e um microfone localizado no campo reverberante, o sinal capturado pelo microfone é a soma das contribuições de um grande número de modos, onde a fase e a amplitude de cada contribuição variam com a posição de gravação. Conseqüentemente, a resposta complexa em frequência pode ser considerada como um processo estocástico espacialmente dependente, cujas partes real e imaginária são processos Gaussianos independentes, de mesma variância, (Kuttruff, 1979; Cremer et al, 1982 e Schroeder, 1965). Essa densidade Gaussiana bidimensional vem do teorema do limite central, considerando-se independência entre os modos e implica que a amplitude da resposta em frequência segue uma distribuição de Rayleigh. Essas propriedades estatísticas também são válidas quando a resposta complexa é um processo estocástico dependente da frequência. Elas podem ser aplicadas, independente da posição do microfone, desde que o campo direto possa ser desprezado em comparação com o campo reverberante, e independente da sala, em frequências acima de uma frequência limite (que depende da geometria do ambiente).

Como consequência da alta sobreposição modal, os picos na resposta em frequência não correspondem às frequências naturais individuais. Embora a densidade modal aumente com o quadrado da frequência, como o indicado pela equação (2), a separação média entre os picos adjacentes só depende da largura de banda modal. Assim, a densidade de picos no domínio da frequência é proporcional ao tempo de reverberação.

$$\text{Número médio de picos por Hz : } D_f = \frac{\sqrt{3}}{\delta} = \frac{T_r}{4} \quad (5)$$

Este modelo estatístico se baseia na consideração de alta sobreposição modal no domínio da frequência, o que não se verifica em baixas frequências. A “frequência de Schroeder”, acima da qual a teoria é válida, foi determinada experimentalmente, sendo dada (unidades SI) por :

$$f_{Schroeder} = 2000 \sqrt{\frac{T_r}{V}} \quad \text{(Hz)} \quad (6)$$

Combinando-se as equações (1), (2), (5) e (6), verifica-se que esta condição corresponde a uma sobreposição modal de no mínimo 3 para 1, isto é, o espaçamento médio entre as frequências naturais deve ser menor que um terço da largura de banda de um modo, para que o modelo seja válido.

#### 4.2 MODELO ESTATÍSTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO.

Para o ouvido humano o som de uma resposta impulsiva reverberante é muito semelhante ao som de um ruído branco multiplicado por uma envoltória com decaimento exponencial. Por essa razão, uma resposta sintetizada dessa maneira, quando convoluída com sinais anecóicos, pode produzir um efeito reverberante bem natural. Para se conseguir, nesse processo de sintetização, que o tempo de reverberação seja dependente da frequência, é conveniente que se utilize um banco de filtros, somando-se os sinais de cada banda após multiplicar cada um deles por envoltórias com diferentes decaimentos exponenciais, conforme o indicado na Fig. (1).

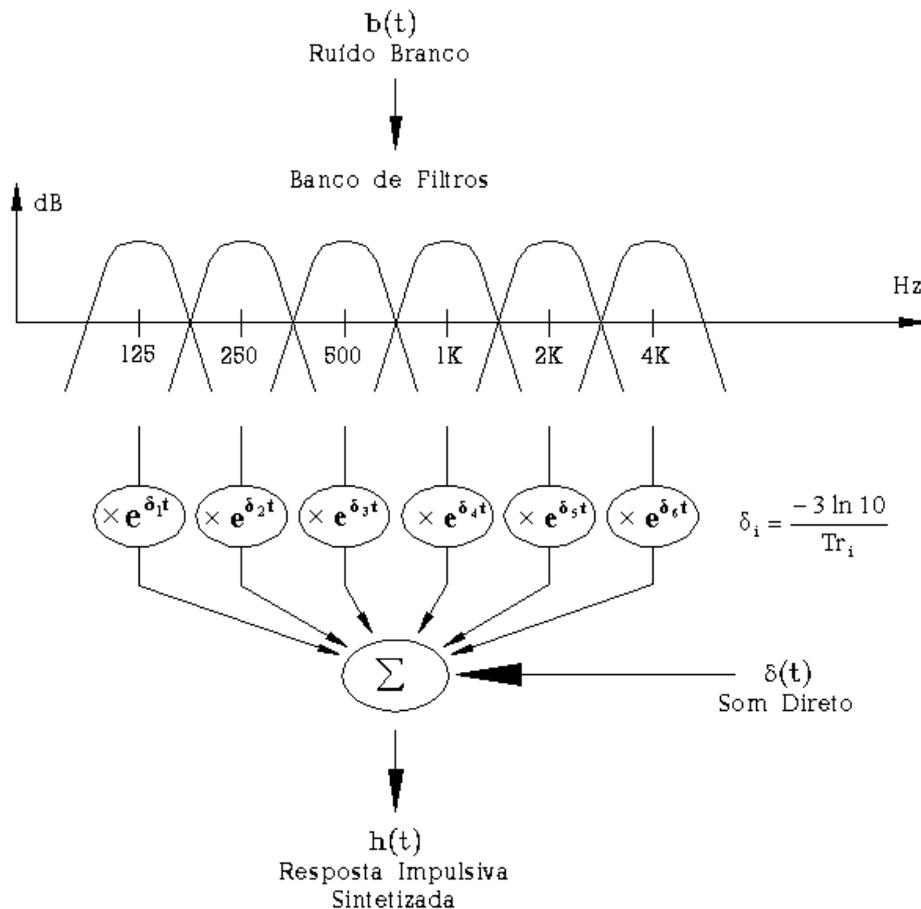


Figura 1. Processo de geração de decaimento aleatório dependente da banda

Nesse modelo de Polack, a resposta impulsiva é descrita como um processo estocástico não-estacionário:

$$h(t) = b(t) e^{-\delta t} \quad \text{para } t > 0 \quad (7)$$

onde  $b(t)$  é um ruído Gaussiano estacionário centrado, e  $\delta$  está relacionado ao tempo de reverberação  $T_r$  pela equação (4). O ruído aleatório  $b(t)$  é caracterizado por sua densidade espectral de potência  $P(f)$ . Vide Jot et al (1997).

Vale a pena destacar o fato de que, também no domínio do tempo, existe um valor a partir do qual o modelo estocástico se torna válido. A resposta temporal será Gaussiana somente se um determinado número de reflexões se sobrepuser em algum instante ao longo da resposta. Assim, a partir desse instante, os picos no ecograma ( $h(t)^2$ ) não mais corresponderão às chegadas de reflexões individuais. Como a densidade de reflexões aumenta no tempo, de acordo com a equação (1), a situação é muito semelhante à que ocorre no domínio da frequência, exceto em relação ao fato de que a “largura” (duração) de uma reflexão no domínio do tempo não pode ser definida apenas em relação às propriedades intrínsecas da sala, embora a largura de banda de um modo possa.

O espalhamento (largura) de uma reflexão no domínio do tempo está relacionado à largura de banda da fonte – que determina a largura do pulso emitido – ou à largura de banda do receptor. Polak escolhe como critério a sobreposição de no mínimo 10 reflexões em 24 milisegundos, concluindo, pela equação (1), que o tempo limite  $t_{mixing}$  (em ms) é correspondente à raiz quadrada do volume da sala (em  $m^3$ ), isto é,

$$t_{mixing} \approx \sqrt{V} \quad (8)$$

Este valor é utilizado também por muitos pesquisadores como correspondente ao momento de transição das reflexões iniciais (early reflections) para a reverberação. A partir desse tempo limite, se a origem no gráfico de  $h(t)^2$  (ecograma) corresponder ao instante de emissão do pulso sonoro, a reverberação torna-se um processo difuso, isto é, a densidade de energia acústica está uniformemente distribuída na sala e há superposição dos vetores intensidade de direções aleatórias. O módulo do vetor intensidade resultante se mantém próximo a zero.

A característica “misturadora” (mixing) de uma sala depende de sua geometria e das propriedades difusivas dos contornos. Após esse limite  $t_{mixing}$ , a densidade de ecos aumenta exponencialmente com o tempo e não mais com  $t^2$ . Conseqüentemente o valor  $\sqrt{V}$  pode ser considerado como um limite superior do instante de transição para campo difuso. Em salas “misturadoras” (equipadas com difusores, ou incidentalmente muito difusivas) essa transição pode ocorrer mais cedo.

Concluindo, as condições de validade de um modelo estocástico de reverberação no domínio conjunto tempo-frequência podem ser representadas pelos intervalos indicados na Fig. (3), para valores de frequência superiores à Frequência de Schroeder dada pela equação (5), e instantes superiores ao  $t_{mixing}$  dado pela equação (8).

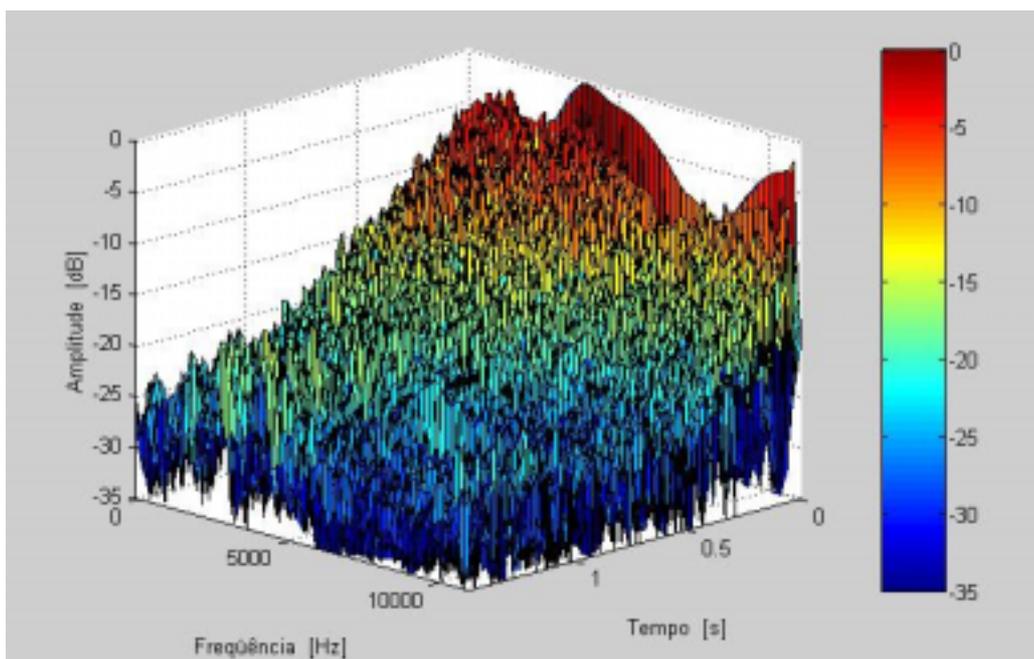


Figura 2. Representação Tempo-frequência da resposta de uma sala.

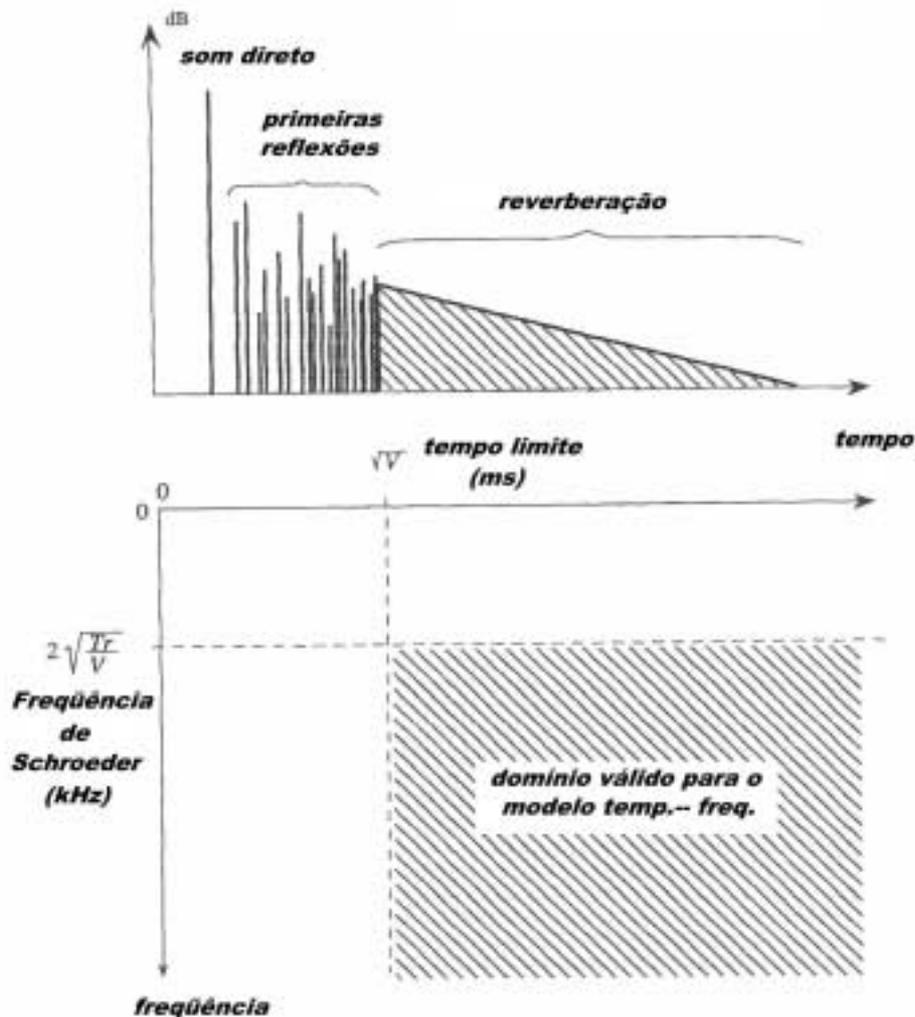


Figura 3. Limites de validade para o modelo estocástico

### 4.3 SÍNTESE DO TRECHO FINAL DA RESPOSTA

O modelo estatístico tempo-frequência apresentado na seção anterior viabiliza a síntese da parte reverberante de respostas impulsivas de salas, considerando o decaimento exponencial da reverberação naquele intervalo, nas bandas de interesse. Esta síntese é conseguida através do processamento indicado no diagrama de blocos apresentado na Fig. (4).

Inicialmente a resposta impulsiva é analisada via Transformada Wavelet para que sejam calculados os decaimentos nas bandas de oitava abrangidas pelo modelo reduzido. Acrescenta-se a banda de 16 kHz para a qual se utiliza o decaimento padrão de 100 dB/s, que corresponde a  $T_r=0,6s$ . Os decaimentos nas demais bandas (2, 4 e 8 kHz) serão estipulados pela interpolação linear das taxas de decaimento entre a última banda presente no sinal (1 kHz) e a taxa limite de 100 dB/s.

A contribuição de cada banda de oitava para o trecho reverberante artificial é gerada a partir de ruído branco filtrado na oitava correspondente, ponderado pela exponencial de decaimento apropriado. Como o indicado na Fig. (1), tais contribuições são somadas, compondo a parcela artificial que será adicionada ao trecho inicial da resposta impulsiva. Para que haja compatibilidade entre as amplitudes dos dois trechos justapostos, considera-se a envoltória da resposta global.

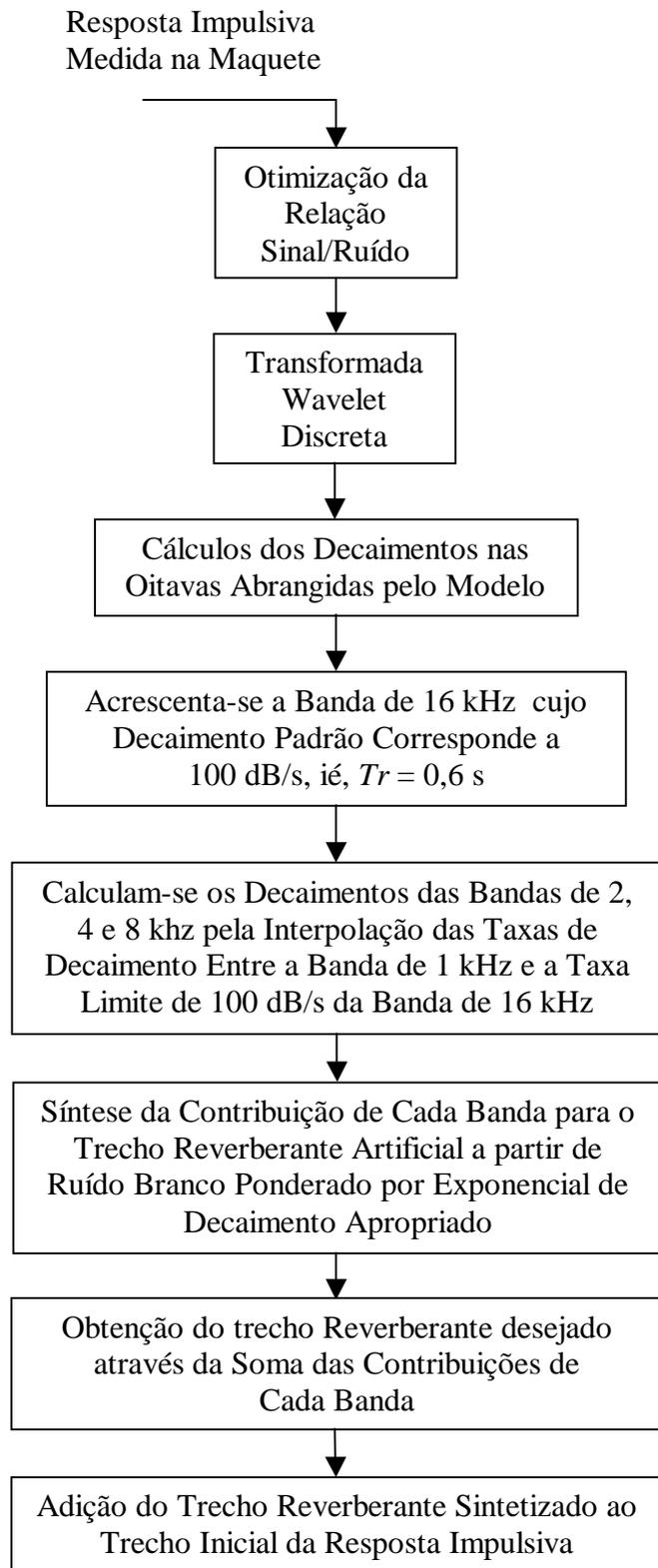


Figura 4. Diagrama de blocos do processamento imposto ao sinal.

## 5. CONCLUSÕES

Destacou-se a importância de um modelo estocástico no domínio conjunto tempo-frequência na adequação de respostas impulsivas obtidas em maquetes, com objetivos de auralização. Descreveu-se também um método computacional para análise de tais respostas e síntese do trecho reverberante ausente nas mesmas.

Embora a grande maioria dos profissionais de acústica ainda não utilize intensamente as Representações Tempo-frequência como ferramenta auxiliar na determinação dos parâmetros objetivos e/ou na geração de efeitos subjetivos (reverberação artificial), estas técnicas trazem consigo vantagens específicas decorrentes da dimensão acrescentada em relação aos métodos tradicionais.

## 6. REFERÊNCIAS

- Cremer, L. and Müller, H., 1982. *Principles and Applications of Room Acoustics*, Applied Science Publishers Ltd.
- Feiteira, J. F., Zindeluk, M., Massarani, P. M., 1998, “Avaliação de Transdutores Acústicos Através da Distribuição de Wigner”, Anais do 1<sup>o</sup> Congresso Iberoamericano de Acústica e 18<sup>o</sup> Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Florianópolis-SC, Brasil, pp. 391-394.
- Feiteira, J. F., Zindeluk, M., Medeiros, J. B., Carvalho, L., 2000, “Uso de Modelos Reduzidos e Processamento de Sinais para o Projeto Acústico de Salas”, Anais do XIX Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Belo Horizonte-MG, Brasil, pp. 306-311.
- Jot, Jean-Marc, 1997, “Analysis and Synthesis of Room Reverberation Based on a Statistical Time-Frequency Model”, Presented at the 103<sup>rd</sup> Convention of Audio Eng. Soc.
- Kuttruff, H., 1979, *Room Acoustics*, 2<sup>nd</sup> edition. Applied Science Publishers Ltd, London.
- Massarani, P. M., Feiteira, J. F., Zindeluk, M., 1996, “Utilização de Representações Tempo-Frequência em Acústica e Vibrações.”, *Anais do 1<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações e 17<sup>o</sup> Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, pp. 85-88, Petrópolis.
- Polack, J. – D., 1988, “La Transmission de l’Énergie Sonore dans les Salles”. Thèse de Doctorat d’Etat, Université du Maine, Le Mans.
- Polack, J. – D., 1993, “Playing billiards in the concert hall: the mathematical foundations of geometrical room acoustics”. *Applied Acoustics* 38:235-244.
- Schroeder, M., R., 1962, “Natural-sounding Artificial Reverberation”, *J. Audio Eng. Soc.* 10(3) .
- Schroeder, M. R., 1965. “New Method for Measuring Reverberation Time”, *J. Acoust. Soc. Am.* 37:409-412.
- Schroeder, M. R., 1987, “Statistical parameters of the frequency response curves of large rooms”. *J. Audio Eng. Soc.* 35: 299-306.

# ADDING REVERBERATION TO ROOM IMPULSE RESPONSES MEASURED IN SCALE MODELS

**José Flávio Feiteira**  
UNESA e COPPE/UFRJ

**Moysés Zindeluk**  
COPPE/UFRJ

**José Bismark de Medeiros**  
COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Mecânica  
Laboratório de Acústica e Vibrações – C.P. 68503 – 21945-170 – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Abstract.** Scale Models are good tools for predicting the acoustic behavior of rooms. Parameters like the sound pressure distribution, reverberation time and diffraction effects, corresponding to different configurations of acoustic treatment and to different position in the room, may be calculated using such a tool. This paper reviews a statistical time-frequency model of late impulse responses decays and describes an associated analysis/synthesis procedure for generating the artificial reverberation for auralization purposes.*

***Keywords.** Room Acoustics, Scale Models, Time-Frequency Analysis, Impulse Response, Signal Processing.*