

# Acústica & Vibrações

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

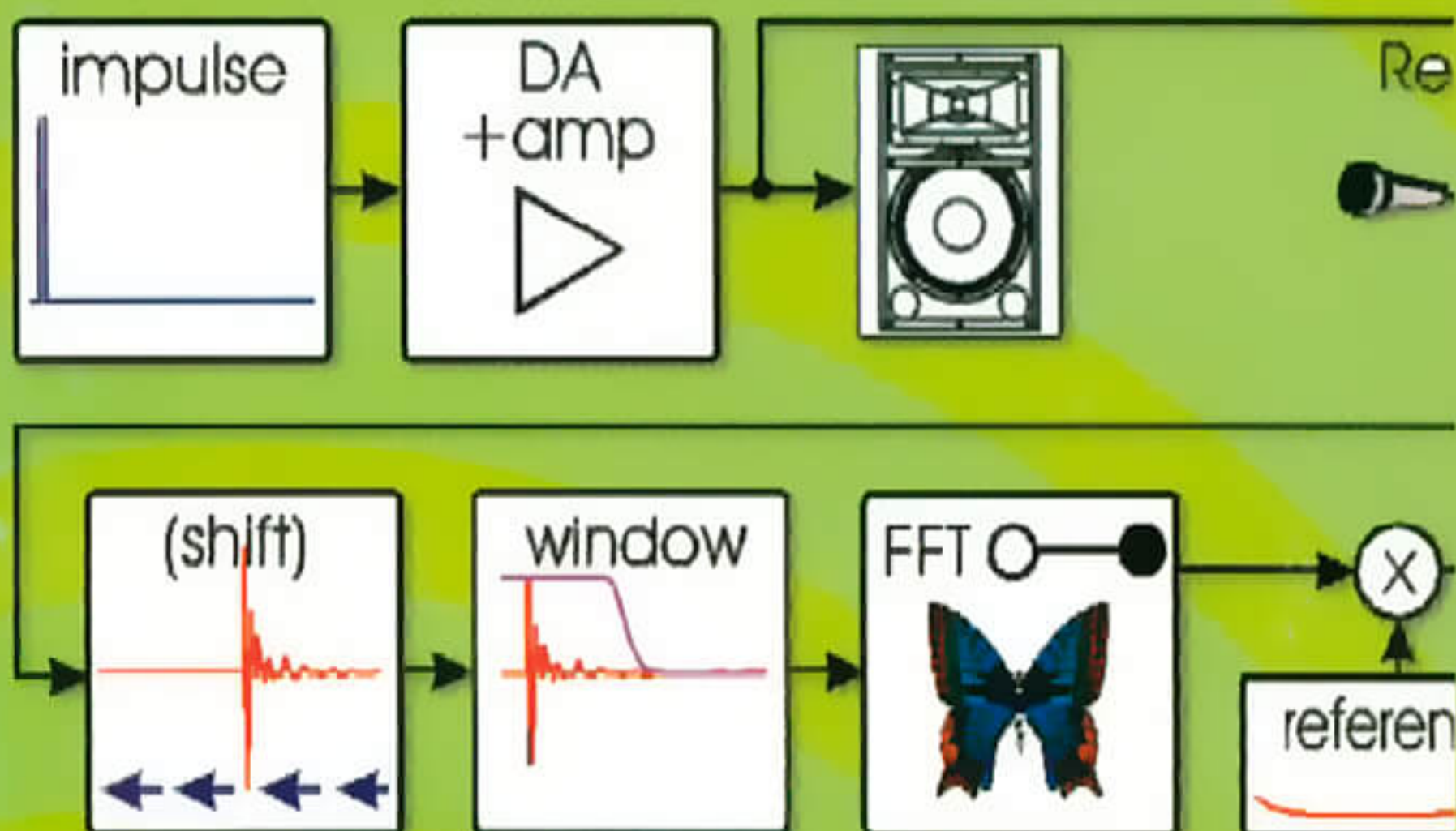
DEZEMBRO 2005 \_ N°36 \_ REVISTA SEMESTRAL



Difusão sonora em salas de concerto e difusores



Investigação experimental da direcionalidade sonora de uma harpa de concerto



Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva



Inarmonicidade e afinação de pianos

# Expediente

Revista Semestral da  
Sociedade Brasileira de Acústica -  
SOBRAC

Departamento de Engenharia Mecânica - EMC  
Campus Universitário  
Cx. Postal 476 - CEP 88040-900  
Florianópolis -SC- Brasil  
<http://www.sobrac.ufsc.br>  
e-mail: <[sobrac@mbox1.ufsc.br](mailto:sobrac@mbox1.ufsc.br)>  
Tel: (048) 3234-4074/ 3331-9227  
Fax: (048) 3269-9882

## Diretoria SOBRAC 2005/2006

Presidente: Samir N.Y. Gerges  
Vice-Presidente: José Augusto de Azevedo  
1º Secretário: Mauricy C.R. de Souza  
2º Secretário: Moysés Zindeluk  
1º Tesoureiro: Ulf H. Mondl  
2º Tesoureiro: Carlos M. Grandi

## Conselho SOBRAC 2002/2005

Fernando H. Aidar (Consultor)  
Marco Vecchi (UFMG)  
Mario Pimentel (VIBRANIHIL)  
Mauricy C.R. de Souza (UFSC)  
Moysés Zindeluk (UFRJ)  
Emmanuel B. Garakis (EMBAER)  
Marcos F. Piai (BRÜEL & KJAR)  
Ricardo E. Musafir (UFRJ)  
Honório C. Lucatto (Waytech)  
Samuel C. Penha Valle (INMETRO)

## Suplentes

Alice B. Rodrigues  
Humberto Yukata Kagohara  
Newton S. Soeiro

## Corpo Editorial

Samir N.Y. Gerges  
Mauricy C.R. de Souza  
Stephan Paul

## Editoração e Diagramação

Stephan Paul  
[st.paul@emc.ufsc.br](mailto:st.paul@emc.ufsc.br)

## Design de Arte e Capa

William D'Andrea Fonseca

## Sumário

Editorial ..... 2

## Artigos

Investigação experimental da direcionalidade sonora de uma harpa de concerto ..... 3

Arruda, J.R.F.; Gautier, F.; Renger, M.; Le Carrou, J.L.; Gilbert, J.

Difusão sonora em salas de concerto e difusores ..... 10

Bistafa, S.R.

Inarmonicidade e afinação de pianos ..... 28

Goldemberg, R.

Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva ..... 34

Masiero, B.S.; Iazetta, F.

## Informações

Congressos ..... 42

Socios da SOBRAC ..... 52

Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES ..... 53

## Editorial



# SOBRAC em 20 anos

É sempre saudável uma organização avaliar sua missão e objetivos e propor mudanças para garantir sua contribuição e dar continuidade a sua existência. Esta sempre foi a visão da SOBRAC.

Fundada em 21 de novembro de 1984, a Sociedade Brasileira de Acústica tem o objetivo de difundir informações entre pesquisadores, fabricantes, consultores e usuários. A revista “Acústica e Vibrações” é publicada semestralmente e abrange atividades, eventos e pesquisa na área de vibrações e ruído. Ela é distribuída para os sócios brasileiros e demais sociedades acústicas internacionais.

Desde 1985 a SOBRAC é membro do I-INCE (*International Institute of Noise Control Engineering*), do IIAV (*International Institute of Acoustics and Vibration*), do ICA (*International Commission of Acoustics*) e da FIA (Federação Iberoamericana de Acústica), participando das discussões para a elaboração da Lei do Silêncio, em 1990, e do Ruído Veicular, em 1993. Têm ainda representantes na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e em outras instituições relacionadas à segurança no trabalho e ao conforto acústico.

A sociedade é constituída por vários grupos de trabalho: o grupo de Ruído Veicular, responsável pela organização de simpósios em São Paulo; o de Acústica de Edificação, que promove encontros em conjunto com grupos de Ergonomia e Conforto Térmico; e o grupo de Conservação da Audição e Protetores Auditivos, que trabalha com outras entidades de segurança e medicina do trabalho.

Durante minha gestão na presidência, conseguimos consolidar a SOBRAC em nível nacional e internacional. Participamos efetivamente nos congressos internacionais representando o Brasil, como no *Congress Selection Committee of I-INCE*, entidade que decide sobre os congressos da I-INCE, e no *Board of Directors* da ICA e IIAV. Conseguimos trazer o maior congresso, *International Congress of Noise Control Engineering – Internoise 2005* para o Brasil, depois de 20 anos de luta, que foi realizado de 07 a 10 de agosto de 2005, no SOFITEL, Rio de Janeiro, com a presença de mil participantes de 43 países, realização de três cursos, seis palestras convidadas, 36 sessões técnicas paralelas, 529 trabalhos técnicos apresentados, o que mostra o grande sucesso deste evento no Brasil (visite o site <http://www.internoise2005.org.br/> para ver o programa executado e as fotos do evento).

A revista da SOBRAC “Revista de Acústica e Vibrações” é publicada em julho e dezembro, e a sua edição especial de julho 2005 foi o livro dos resumos do Internoise 2005. A partir da edição de dezembro 2005 a revista adquire um novo formato seguindo o padrão internacional. A partir de 2006 uma nova diretoria vai assumir a direção da SOBRAC com previsão de um corpo editorial novo da revista.

Para finalizar, gostaria de agradecer o apoio de todos dado durante minha gestão e desejo um trabalho pleno de realizações para o próximo presidente e diretoria de 2006-2008.

Samir N.Y. Gerges

Presidente da SOBRAC 2002-2005

# Investigação experimental da direcionalidade sonora de uma harpa de concerto

Arruda, J.R.F.\*; Gautier, F.†; Renger, M.†; Le Carrou, J.L.†; Gilbert, J.†

\*Laboratório de Vibroacústica (LVA), Unicamp, Campinas, Brasil, arruda@fem.unicamp.br

†Laboratoire d'Acoustique (LAUM), Université du Maine, Le Mans, França, francois.gautier@univ-lemans.fr

## Resumo

A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade. A direcionalidade é um dos atributos do som produzido por instrumentos musicais que influenciam na percepção sonora do ouvinte. A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz uma sensação de espacialização do som, que tem sido investigada com interesse crescente por pesquisadores da área de acústica musical e eletroacústica. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante não só garantir a fidelidade em termos de resposta em frequência, mas também conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade de diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura. Neste trabalho, a direcionalidade de uma harpa de concerto é investigada. As medidas frequenciais em regime estacionário foram feitas usando uma grade de medidas com 400 pontos distribuídos sobre uma superfície hemisférica erguida sobre um pequeno trecho cilíndrico em uma câmara semi-aneecóica. Três pontos da tábua harmônica foram excitados com um excitador eletrodinâmico acionado por um sinal aleatório do tipo ruído branco, sendo um ponto de excitação para cada faixa de frequências analisada. Os resultados mostram que, em baixas frequências, a direcionalidade da harpa tem padrões simples e pode ser reproduzida com dois monopólos acústicos situados nas posições da tábua harmônica e da abertura traseira. Modelos mais complexos, constituídos de múltiplas fontes sonoras do tipo monopólo, foram ajustadas aos dados medidos para reproduzir os padrões de direcionalidade em frequências mais altas. A possibilidade de reprodução dos sons produzidos por uma harpa com uma matriz de alto-falantes mantendo suas características de direcionalidade é discutida.

PACS no.

## 1. Introdução

A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade (ou diretividade) [1]. Para defini-la, formulamos a potência sonora numa superfície esférica de raio  $r$ :

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} \int_{4\pi} P^2(r, \theta, \phi) r^2 d\Omega \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade do som,  $\rho$  a densidade de massa e  $P$  a pressão sonora.

Separando as variáveis, tem-se:

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} r^2 P_r^2(r) \int_{4\pi} H^2(\theta, \phi) d\Omega \quad (2)$$

Na expressão acima, a direcionalidade é expressa por  $H(\theta, \phi)$ . O Fator de Direcionalidade é usualmente definido como:

$$D = \frac{I_{direcional}}{I_{esférica}} = \frac{P_r^2(r)}{P_e^2(r)} \quad (3)$$

onde

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} 4\pi r^2 P_e^2 \quad (4)$$

Neste trabalho, utilizaremos a função  $H(\theta, \phi)$  para caracterizar a direcionalidade.

A direcionalidade é uma característica da fonte sonora. Os livros-texto de acústica geralmente tratam do problema da direcionalidade de fontes sonoras em geral e de alto-falantes em particular. A Figura 1 mostra a direcionalidade de um pistão rígido de raio  $a$  para  $ka = 10$ , sendo  $k$  o número de onda ( $k = \omega/c$ ), onde a função, que é axissimétrica e não depende do ângulo  $\phi$ , é expressa por [1]:

$$H(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (5)$$

A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz a sensação de espacialização do som. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para fazer sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante, portanto, conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura [2]. Uma monografia recente [3] estuda a questão da

Aceito em 21 de Dezembro de 2005.

direcionalidade dos instrumentos musicais tendo em vista a performance musical eletroacústica em salas de concerto e a captação de som em estúdios de gravação. Além de tratar da direcionalidade dos instrumentos, essa monografia aborda questões relativas à acústica de salas. Outros trabalhos recentes abordam a questão da direcionalidade de instrumentos musicais, demonstrando a atualidade do tema [4]-[6].

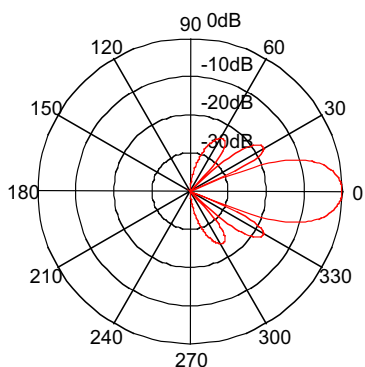


Figura 1: Direcionalidade de um pistão rígido no ar ( $ka = 10$ ).

Pelo fato da direcionalidade de uma caixa de som ser muito diferente da direcionalidade de um instrumento musical, a percepção do som reproduzido eletroacusticamente é prejudicada. Curtin [7] relata que Pierre Boulez costumava dizer que a caixa de som torna 'anônima' uma gravação de um instrumento musical. Num artigo recente, Curtin [7] entrevista o Professor Weinreich da Universidade de Michigan, que introduziu o conceito de 'Directional Tone Color', ou 'Colorido Direcional da Tonalidade'. Estes trabalhos publicados em veículos científicos e artísticos mostram que a direcionalidade é importante na percepção do som musical.

Cabe notar, ainda, que as sensações subjetivas da percepção sonora, estudadas dentro da especialidade chamada de Psicoacústica [8], têm características freqüenciais e temporais. Fenômenos como o mascaramento comprovam isto. Portanto, no estudo da direcionalidade, pode ser relevante estudar não apenas o comportamento em regime estacionário, como é usual, mas também o seu comportamento temporal. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será comentada neste caso.

## 2. Direcionalidade da harpa em regime estacionário

A harpa investigada é uma harpa de concerto Camac Atlantide Prestige (Figura 2). Três faixas de freqüência foram escolhidas: 100 Hz-1 kHz, 50 Hz-5 kHz e 5 kHz-15

kHz. Para cada uma delas, um pontos de excitação diferente foi escolhido e um excitador eletrodinâmico (*shaker*) foi conectado através de uma haste flexível à tábua harmônica próximo ao ponto de fixação das cordas, acessível através das aberturas do fundo da caixa acústica do instrumento. Para as freqüências mais baixas, a primeira abertura, junto à base do instrumento, foi usada (correspondendo às notas mais baixas). Para a faixa média foi usada a abertura central e para a faixa mais alta a menor abertura, à altura das notas mais altas. A figura 3 mostra um esquema da montagem experimental para a faixa média.



Figura 2: O modelo de harpa estudado (Camac Atlantide Prestige)

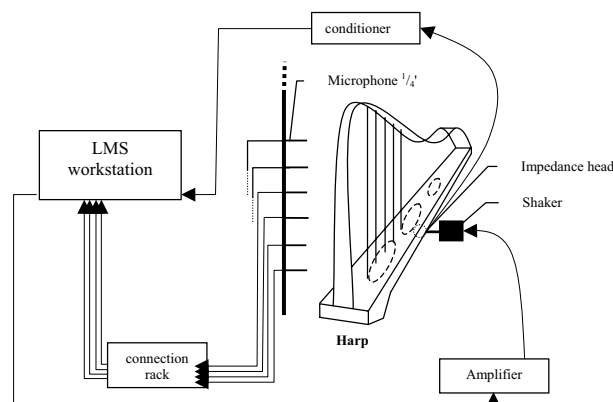


Figura 3: Esquema da montagem experimental

Para levantar as curvas de direcionalidade, foi utilizada uma 'antena' de microfones de instrumentação omnidirecionais de 1/4" (eletreto, ICP), normalmente utilizados em

um sistema de holografia acústica. A configuração da antena, composta de 35 microfones, montada em uma estrutura de modo a formar um círculo alongado nas duas pontas, é mostrada na Figura 4.

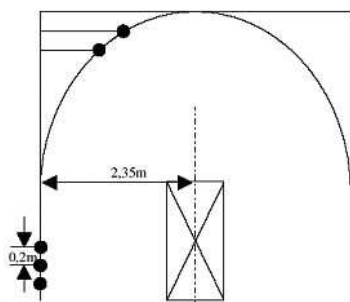


Figura 4: Configuração da "antena" de medição com 35 microfones

A maioria dos estudos sobre a direcionalidade de instrumentos musicais preconiza uma distância entre a fonte e os microfones de 2m para que se possa considerar uma condição de campo distante [1]. Para uma frequência mínima de 150 Hz, uma distância mínima de 2,26m seria necessária para a condição de um comprimento de onda de distância da fonte, uma vez que a relação entre comprimento de onda e frequência é dada por [1]  $\lambda_{max} = c/f_{min}$ , onde  $\lambda_{max}$  é o maior comprimento de onda na faixa e  $f_{min}$  é a frequência mínima. A distância dos microfones foi fixada em 2,35m do centro geométrico da harpa, que pode, no nosso caso, ser representada por um retângulo de 1,20m de altura e 0,7m de lado. As diagonais deste retângulo são as descritas pela tábua de harmonia quando esta gira sobre um eixo vertical.

O ensaio foi feito em uma câmara semi-aneecóica do Centre de Transfert de Technologie du Mans, em Le Mans, França. A harpa foi colocada sobre um dispositivo giratório e as medições foram feitas em ângulos espaçados de 10°. A Figura 5 mostra uma fotografia da montagem experimental em câmara anecóica. A Figura 6 mostra a malha de pontos de medida em torno da harpa no ensaio em regime estacionário.

Num primeiro ensaio, as medidas foram feitas em um hemisfério com 360° para verificação da simetria da fonte. Verificada a simetria, as demais medições foram simplificadas para 180° para diminuir o volume de dados medidos. A excitação foi feita com um sinal de excitação aleatório do tipo ruído branco. A medida de amplitude e fase foi feita para cada microfone usando como sinal de referência o sinal de força medido com uma cabeça de impedância. A amplitude e a fase da pressão em cada ponto foram obtidas multiplicando o espectro cruzado entre a pressão e o sinal de referência pela raiz quadrada do

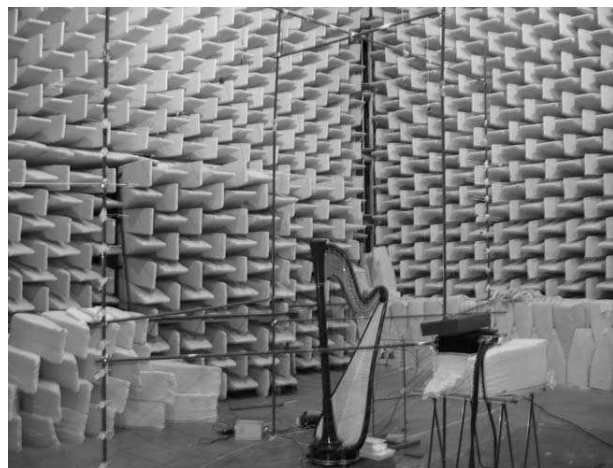


Figura 5: Fotografia da montagem experimental em câmara anecóica

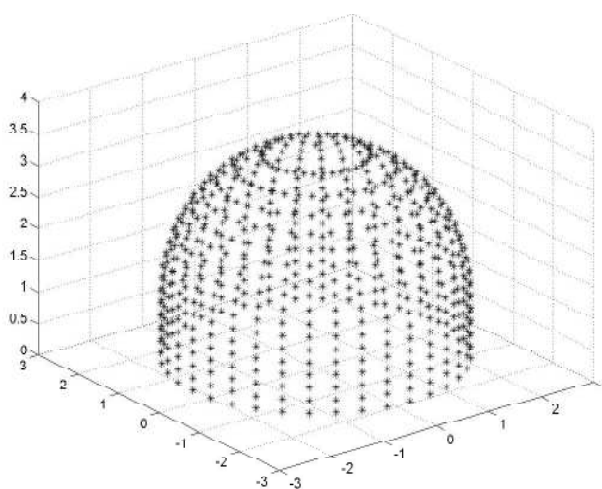


Figura 6: Malha de pontos de medida da pressão no ensaio em regime estacionário

auto-espectro deste sinal. A aquisição foi simultânea em 36 canais.

Para cada frequência, tem-se um padrão de direcionalidade que pode ser visualizado traçando a distribuição da pressão em função do ângulo de rotação da harpa  $\theta$  e da altura  $z$  em relação ao solo (ângulo  $\phi$ ). Para ilustrar, as Figuras 7, 8 e 9 mostram a distribuição de pressões nas frequências de 148, 198 e 248 Hz.

### 3. Modelagem por fontes sonoras elementares

Existem várias maneiras de se fazer a modelagem matemática de uma fonte sonora. No caso de instrumentos de corda, o mecanismo de geração do som inicia-se pela excitação mecânica das cordas que, então, vibram em suas frequências naturais, que formam uma série harmônica

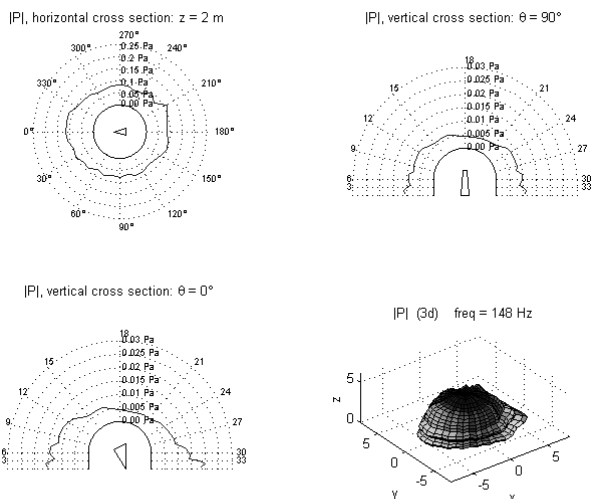


Figura 7: Representação gráfica da direcionalidade medida em 198 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D

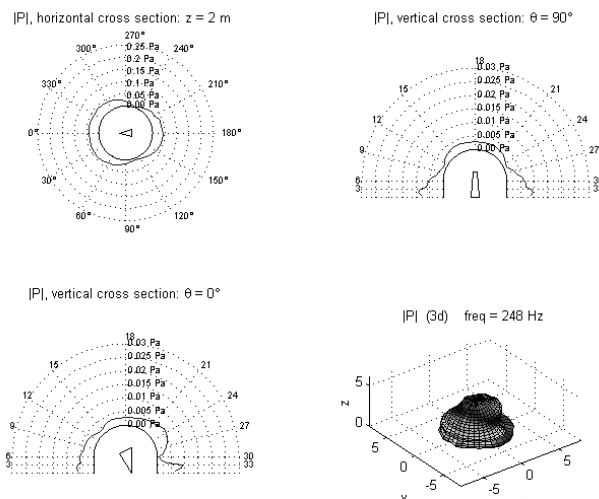


Figura 9: Representação gráfica da direcionalidade medida em 248 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D

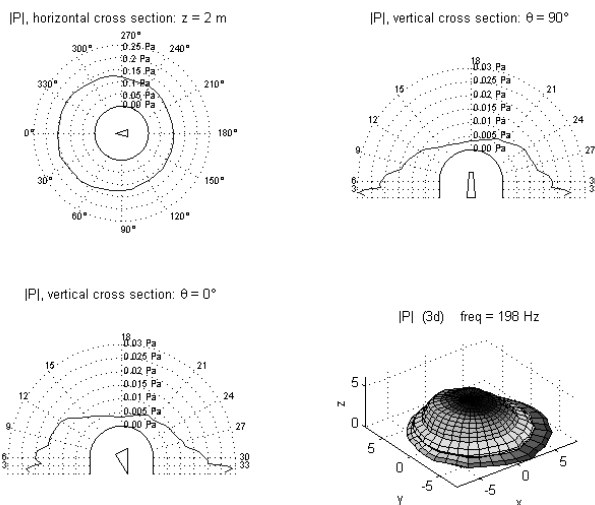


Figura 8: Representação gráfica da direcionalidade medida em 148 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D

(na verdade aproximadamente harmônica, uma vez que as cordas reais não têm um comportamento ideal). As cordas são ligadas a uma estrutura flexível, com uma superfície importante, capaz de transformar de forma eficiente as vibrações em som radiado (tábua harmônica). Como, em frequências muito baixas, a eficiência da radiação de cascas flexíveis é reduzida (as dimensões da superfície teriam que ser demasiado grandes), os instrumentos possuem cavidades acústicas que possuem modos em baixas frequências responsáveis pela produção de som em

notas mais graves. Estas caixas devem ter volume tanto maior quanto mais graves forem as notas que se desejam atingir. Os modelos mais fiéis às características físicas do problema são os modelos que representam a estrutura mecânica do instrumento, particularmente a tábua harmônica e a caixa acústica com suas aberturas. As vibrações desta estrutura imersa no fluido que é o ar geram o campo acústico em torno do instrumento. Ao estudo das vibrações de uma estrutura imersa num meio fluido e sua interação dá-se o nome de vibroacústica [9]. No caso de instrumentos musicais, como o fluido é o ar, pode-se, em uma primeira aproximação, considerar que o ar não altera substancialmente a resposta da estrutura mecânica, no caso em madeira, e o problema pode ser tratado de forma desacoplada: calculam-se as vibrações da estrutura e, num segundo passo, o campo sonoro gerado por estas vibrações das superfícies. Mesmo assim, a complexidade da geometria dos instrumentos musicais e a dificuldade em caracterizar os materiais (madeiras) de que são feitos, tornam o problema de difícil solução, mesmo utilizando poderosos "softwares" baseados em métodos numéricos como o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno [10].

Uma outra abordagem, mais simples e mais antiga, para modelar fontes sonoras é o chamado método das fontes elementares. Este método vem sendo objeto de interesse renovado pela comunidade de acústica [11][12] por ser de fácil implementação computacional e beneficiar-se dos avanços verificados na álgebra linear computacional, tais como os métodos de regularização [13]. Neste método, a fonte física real, no nosso caso o instrumento musical, é substituída por um conjunto de fontes sonoras elementares, que podem ser monopólos, dipolos ou fontes

de ordem mais elevada. O mais comum, e que será usado aqui, é utilizar monopólos.

O campo de pressão sonora criado por um monopólo em espaço semi-anecóico pode ser obtido colocando-se uma fonte igual de forma simétrica à superfície rígida (Figura 10) e a pressão resultante para uma vazão da fonte  $Q$  pode ser expressa como:

$$p(r, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ 1 + \frac{e^{-jk_r}}{|r|} \left( \frac{|r|}{|r'|} e^{-jk(r-r')} \right) \right\} Q \quad (6)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ .

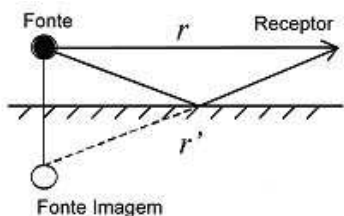


Figura 10: Configuração para representação de um monopólo em espaço semi-anecóico

Um primeiro modelo muito simples para representação da harpa como fonte sonora em baixas frequências, baseado em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratoire d'Acoustique da Universidade do Maine (LAUM) consiste de apenas dois monopólos, um situado na tábua de harmonia e um situado na abertura na caixa acústica, ambos próximos à base do instrumento, onde as baixas frequências são excitadas. A Figura 11 mostra a posição das duas fontes. As coordenadas utilizadas no modelo foram  $y_t = 0,26$  m,  $z_t = 0,45$  m,  $y_h = 0,41$  m e  $z_h = 0,37$  m. As vazões destas duas fontes são denotadas por  $Q_t$  e  $Q_h$ , respectivamente. A pressão numa posição distante de  $r_t$  em relação a  $Q_t$  e de  $r_h$  em relação a  $Q_h$  é expressa como:

$$p(r_t, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-jk_r t}}{|r_t|} \left( 1 + \frac{|r_t|}{|r'_t|} e^{-jk(r_t-r'_t)} \right) + \frac{e^{-jk_r h}}{|r_h|} \left( 1 + \frac{|r_h|}{|r'_h|} e^{-jk(r_h-r'_h)} \right) \right\} \times \begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Dado um conjunto de pontos onde a pressão é medida, tem-se um igual número de equações como a equação (7). Estas equações constituem um sistema linear de equações, tendo como incógnitas as duas vazões, e podem ser organizadas de forma matricial. A solução deste sistema pode ser expressa da forma:

$$\begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\rho} [\text{Geo}]^+ \{p(r, \omega)\} \quad (8)$$

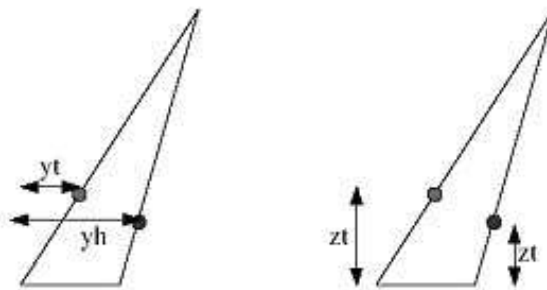


Figura 11: Posição dos dois monopólos no modelo simples da harpa

onde  $[\ ]^+$  denota a inversa generalizada de uma matriz, que produz, neste caso, a solução de mínimos quadrados. Assim, são obtidas as vazões dos monopólos que caracterizam a harpa em baixas frequências.

Observou-se que as vazões das duas fontes são de magnitude próxima e fase igual até 180 Hz e oposta de 180 Hz a 220 Hz (12). Isto veio confirmar a interpretação física do fenômeno em baixas frequências proposta no LAUM em estudos anteriores, mostrada na Figura 13.

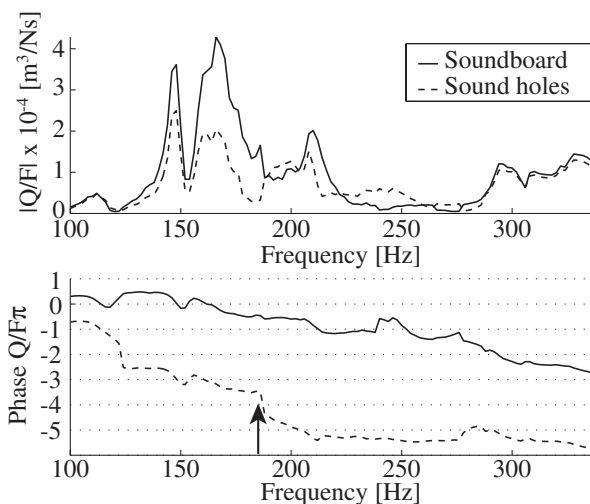


Figura 12: Magnitude e fase das vazões  $Q_t$  e  $Q_h$  (as linhas pontilhadas indicam uma diferença de  $\pi$  radianos)

Para frequências de até cerca de 220 Hz o modelo de dois monopólos representa razoavelmente bem o padrão de direcionalidade da harpa. Para frequências superiores são necessários mais monopólos. A Figura 14 mostra a direcionalidade do modelo de dois monopólos comparada à direcionalidade medida na harpa em 352 Hz, deixando evidente que o modelo não consegue representar a direcionalidade de 4 lóbulos da harpa.



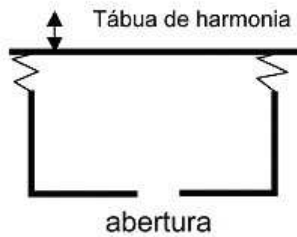


Figura 13: Modelo físico da harpa em baixas frequências proposto no LAUM

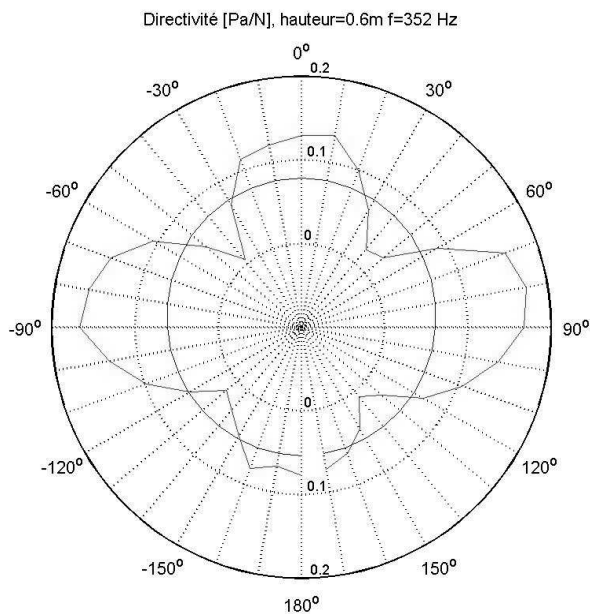


Figura 14: Direcionalidade medida da harpa e direcionalidade do modelo de duas fontes elementares em 352 Hz

#### 4. Direcionalidade temporal da harpa em regime transitório

Como comentado antes, o comportamento temporal da direcionalidade de um instrumento musical também é relevante para a percepção sonora. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será brevemente descrita aqui.

Como o estudo temporal exige que todos os sinais de pressão sejam registrados simultaneamente, o sistema de aquisição de sinais de 36 canais usado impôs uma limitação ao número de pressões medidas. Como um dos canais foi usado para registro de voz, decidiu-se fazer uma antena circular plana de 35 microfones com base na hipótese de que a direcionalidade horizontal é mais importante que a vertical no caso em estudo.

Foram registrados os sons produzidos por uma harpista, primeiramente com cada nota separadamente e, depois, com glissandi. Diversos registros temporais em diferentes faixas de frequência e com diferentes durações foram feitos. A harpa é dotada de 46 cordas, sendo as de número 45 a 34 cordas de aço, as de 33 a 7 de tripa e as de 6 a 0 de nylon. No primeiro registro, na faixa DC-2kHz, com 8 segundos de duração, todas as cordas foram sucessivamente excitadas, da Do45 à Sol00. Da corda 45 à corda 25, o ataque é feito da mão esquerda e, da 24 à 00, da mão direita. A corda 25 pode ser atacada indiferentemente da mão direita ou esquerda. Num segundo teste, para cada faixa de notas, foi escolhida uma faixa de frequências mais apropriada e um tempo de duração adequado, de 1,6s, DC-10,2kHz, para a faixa de notas mais altas (Sol00 a Do24) a 5,12s, DC-3,2kHz, para as mais baixas (Sol41 a Do45). Os glissandi ascendentes, descendentes, em terças e super glissandi foram analisados na faixa DC-3,2kHz com 5,12 segundos de gravação. Além destes, foram gravados ainda os chamados 'sons harmônicos', obtidos pela harpista bloqueando alguns modos das cordas opondo-lhes a palma da mão durante o ataque. Os sons xilofônicos são obtidos abafando a base da corda com um dedo durante o ataque. Os sons ditos 'de violão' são provocados pelo ataque da corda em sua base.

A Figura 15 mostra um esquema do aparato experimental e a Figura 16 uma fotografia tirada durante as gravações.

O conjunto de sinais digitalizados está organizado em um CD-ROM aguardando a análise de direcionalidade temporal, que será feita na sequência do projeto e reportada em futuros trabalhos.

#### 5. Conclusões e perspectivas

Foram feitas medidas de direcionalidade em uma harpa de concerto em regime estacionário no domínio da frequência. Em baixas frequências (abaixo de 220 Hz) confirmaram-se estudos realizados no LAUM que indicavam que a harpa funciona basicamente como um dipólo com a tábua de harmonia e a caixa acústica atuando como monopólos em fase ou em oposição de fase. Em frequências mais elevadas, constatou-se que são necessários vários monopólos para representar a direcionalidade de padrões mais complexos da harpa. Utilizou-se o método das fontes elementares para obter os modelos.

Resta fazer uma análise sistemática para caracterizar a harpa em toda a faixa de funcionamento utilizando as ferramentas implementadas neste estudo. Já foram iniciados estudos sobre a otimização do número e do posicionamento das fontes para cada faixa de frequências.

Foram feitas também medidas temporais com a harpa tocada por uma harpista, mas a análise destas medidas ainda não foi realizada. Espera-se poder investigar o efeito de espacialização temporal dinâmica com estes dados. O estudo da direcionalidade em regime estacionário deverá

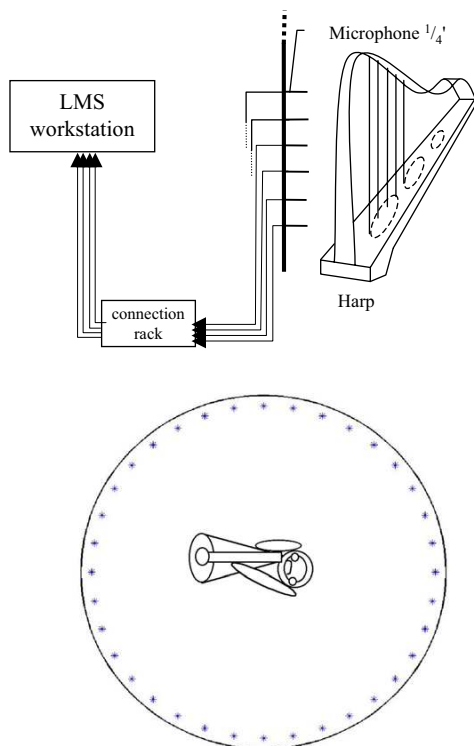


Figura 15: Esquema do aparato experimental para medida temporal da direcionalidade

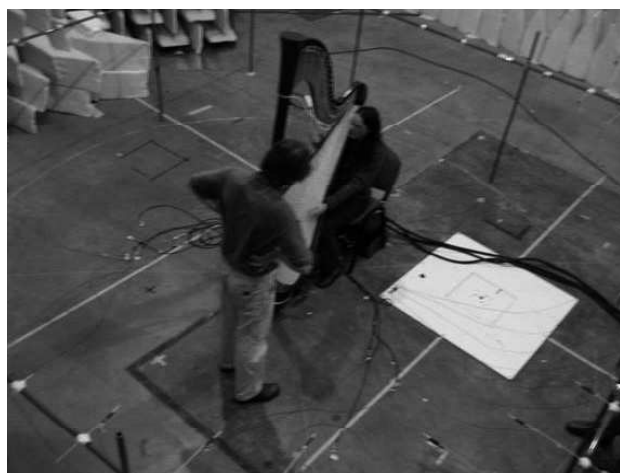


Figura 16: Fotografia do aparato experimental na medida temporal da direcionalidade

auxiliar na interpretação dos fenômenos de direcionalidade temporal.

Esta é uma pesquisa em andamento e deverá ter continuidade através de novos trabalhos de graduação, dissertações e teses. O trabalho foi desenvolvido em colaboração entre o Laboratório de Vibroacústica da UNICAMP e o Laboratoire d'Acoustique da Université du Maine

(França). Futuramente, espera-se poder desenvolver fontes eletroacústicas de direcionalidade capazes de reproduzir o comportamento direcional da harpa.

## Agradecimentos

Os autores são gratos aos alunos E. Boboeuf e F. Grignon da Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, que realizaram as medidas como parte de seu trabalho de graduação e ao Centre de Transfert de Technologie du Mans por ter cedido suas instalações, sua instrumentação e a orientação de seu corpo técnico para a realização das medições. O primeiro autor agradece ainda o apoio da CAPES, que financiou sua estada no LAUM em estágio pós-doutoral.

## Referências

- [1] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V.: *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, 1982, 524p.
- [2] Meyer, J.: *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Frankfurt: Verlag das Musikinstrument, 1980. 259p.
- [3] Mannis, J.A.: *Elementos de Acústica de Salas, Tomada e Projeção do Som na Performance Eletroacústica*, monografia do Programa de Doutorado em Música da UNICAMP, 2003, 27p.
- [4] Jeong, C.-H., Ih, J.-G.: *Modeling of Sound Fields Considering the Acoustical Characteristics of Korean Traditional Musical Instruments*, **Proc. Internoise**, 2003, Seogwipo, Korea, 8p.
- [5] Hill, T.J., Richardson, B.E., Richardson, S.J.: *Acoustical Parameters for the Characterisation of the Classical Guitar*, **Acta Acustica**, (90), 2004, pp. 335-348.
- [6] Stepanek, J., Otcenasek, Z.: *Sound Directivity Spectral Spaces of Violins*, **Proc. ISMA 2001**, Perugia, Italy, pp. 133-136.
- [7] Curtin, J.: *The Violin Finally Speaks*, **The Strad**, April 2000, pp. 390-394.
- [8] Zwicker, E.; Fastl, H.: *Psychoacoustics Facts and Models*, 2<sup>nd</sup> Ed., Springer, 1999, 416 p.
- [9] Hughes W.O., McNelis M.E.: *Recent advances in vibroacoustics*, **Sound and Vibration**, 36(6), 2002, pp. 20-27.
- [10] Wu, T.W.(Editor): *Boundary Element in Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*, bf WIT Series on Advances in Boundary Elements, Vol. 7, 2000.
- [11] Pinho, M.E.V., Arruda, J.R.F.: *On The Use of the Equivalent Source Method for Nearfield Acoustic Holography*, **Anais do 17<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2003)**, ABCM, São Paulo, SP, Nov. 10-14, 2003. CD-ROM, paper 0503, 10 p.
- [12] Magalhaes M.B.S, Tenenbaum R.A.: *Sound sources reconstruction techniques: A review of their evolution and new trends*, **Acta Acustica** 90(2), 2004, pp. 199-220.
- [13] Nelson, P.A., Yoon, S.H.: *Estimation of acoustic source strength by inverse methods: part II, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters*, **Journal of Sound and Vibration**, 2000(a), 233(4), pp 669-705.

# Difusão sonora em salas de concerto e difusores

Bistafa, S.R.:

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica, sbistafa@usp.br

## Resumo

Talvez por mero acaso, salas de concerto concebidas pré-século XX e que ao longo dos tempos adquiriram reputação de excelente qualidade acústica, apresentam naturalmente duas características hoje em dia consideradas essenciais para promoção da difusão sonora – formato retangular e elaborado relevo das superfícies. Baseado em estudos dos principais pesquisadores na área, o presente trabalho mostra como que essas características físicas favorecem o espalhamento sonoro, amenizando as frentes de onda refletidas, gerando, ao que tudo indica, uma resposta subjetiva favorável na apreciação da música. Atualmente dois coeficientes são empregados para caracterização do som refletido por uma superfície – coeficiente de difusão e coeficiente de espalhamento. O primeiro coeficiente é uma medida da uniformidade espacial do som refletido pela superfície, enquanto que o segundo coeficiente é uma medida da capacidade da superfície em remover energia da região especular; este último de utilidade em programas de simulação acústica de salas. Apresentam-se as fórmulas de definição e os métodos empregados na obtenção destes coeficientes, contrastando-se suas potencialidades e aplicabilidades. Discutem-se as características de difusores em termos da resposta espacial, resposta temporal e resposta em frequência. São apresentados os difusores perfilados com seqüências numéricas, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder, e a solução de Fraunhofer/Fourier para predição do espalhamento destes difusores. São apresentadas as seqüências numéricas de resíduos quadráticos, de comprimento máximo e de raízes primitivas que tem sido utilizadas no projeto de difusores e que são denominados respectivamente de QRD, MLS e PRD. Diretrizes para otimização de QRDs são também apresentadas. Finalmente apresentam-se as diferentes concepções físicas que tem sido empregadas na promoção da difusão sonora em salas de concerto concebidas a partir da segunda metade do século XX. As principais conclusões deste tutorial são apresentadas.

PACS no.

## 1. Introdução

A difusão sonora vem sendo cada vez mais considerada no projeto acústico de salas, principalmente após a introdução dos difusores perfilados com seqüências numéricas, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder. Tais difusores apresentam aspecto a gosto das tendências arquitetônicas modernas, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. As características de espalhamento sonoro de difusores podem ser atualmente obtidas numérica e experimentalmente, estas últimas com metodologias normalizadas internacionalmente. Não tão bem caracterizados entretanto, são os efeitos subjetivos da difusão sonora e a quantidade de difusão necessária em salas para os mais diversos usos e programas. Ainda incerta é a modelagem de reflexões difusas em programas de simulação acústica de salas, e na construção da realidade virtual acústica - auralização. O presente trabalho fornece uma visão de como a difusão sonora era incorporada nas salas do passado e que são paradigmas no presente, a evolução, o estado da arte, e como a difusão sonora vem sendo modernamente incorporada em grandes salas de concerto.

## 2. Salas paradigmas do passado

As Figura 1 apresenta quatro salas de concerto construídas antes do século XX, consideradas de excelente qualidade acústica. As características arquitetônicas que parecem mais influenciar na qualidade acústica destas salas são: a forma retangular (*shoe-box*) e o relevo das superfícies.

A Figura 2 mostra detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Großer Saal, Vienna, que são característicos das salas pré-século XX. Observa-se nesta tomada fotográfica a presença de nichos, colunas, capitéis, lustres, e o relevo das superfícies densamente ornamentado, estruturas estas determinantes da difusão sonora da sala. A difusão sonora é considerada uma característica essencial da qualidade acústica de salas de concerto.

## 3. Efeito da forma e do relevo nas frentes de onda

No projeto arquitetônico de salas de concerto, a forma retangular, em leque e elíptica são freqüentemente escolhidas. Estas formas conferem características acústicas variáveis à sala e portanto, a seleção da forma básica da sala é de fundamental importância não somente do ponto de vista arquitetônico, como também do ponto de vista acústico.

Aceito em 26 de Dezembro de 2005.

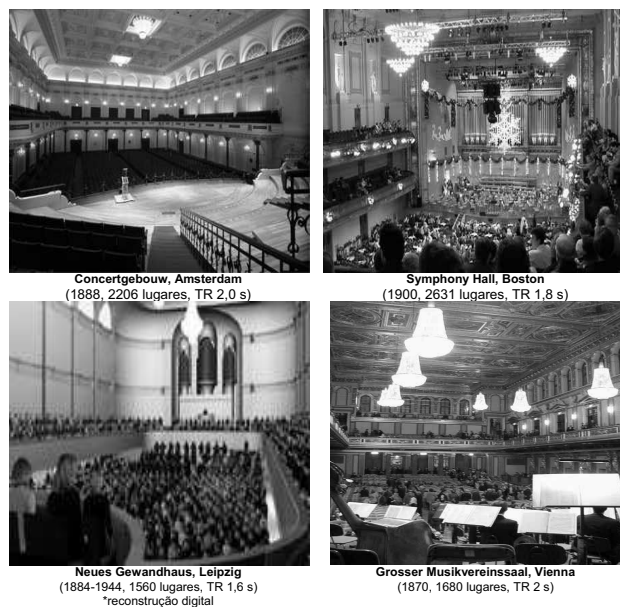


Figura 1: Algumas salas de concerto pré-século XX consideradas como de excelente qualidade acústica



Figura 2: Detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna

A Figura 3 apresenta os resultados de simulação da propagação sonora bidimensional através de flashes instantâneos na sala de formato retangular, em leque e elíptico, todas elas sem tratamento de difusão sonora e com a mesma área em planta de aproximadamente 518 m<sup>2</sup>. Estes resultados foram obtidos resolvendo numericamente, através do método das diferenças finitas, as equações diferenciais da continuidade e da quantidade de movimento em duas dimensões.

Em cada uma das ilustrações da Figura 3, os círculos escuros indicam a posição da fonte e os claros a posição do receptor, no cálculo da resposta impulsiva a ser apresentada mais adiante. Uma análise comparativa destas ilustrações revela que a propagação das frentes de onda é bastante distinta em cada uma das salas. Observa-se clara-

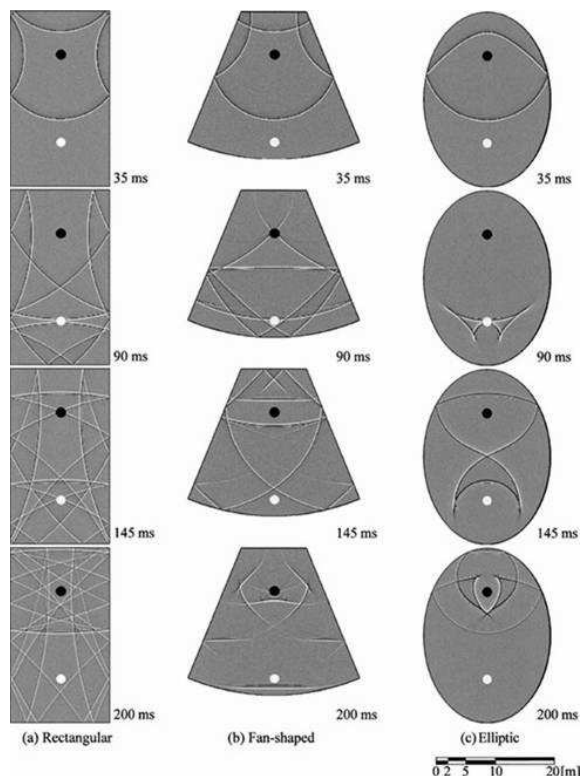


Figura 3: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica sem tratamento de difusão sonora, Fonte: [1]

mente, na sala retangular, que o número de frentes de onda aumenta à medida que o tempo avança, enquanto que na sala em leque e elíptica, há uma tendência à concentração, e ao desenvolvimento de frentes de ondas "defeituosas". Particularmente na sala elíptica, e como era de se esperar, a frente de onda é focada alternadamente na região da fonte, e na sua posição simétrica junto ao receptor.

A Figura 4(a) apresenta as respostas impulsivas no receptor, em cada uma das salas sem tratamento de difusão sonora. Estes resultados revelam que as reflexões são densas e com decaimento suave no caso da sala retangular, enquanto que as reflexões são esparsas e irregulares nas salas em leque e elíptica.

A Figura 5 ilustra o efeito do tratamento de difusão na propagação sonora. Aqui, o tratamento de difusão consiste de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6) introduzido nos contornos de cada sala. A comparação destes resultados com aqueles da Figura 3 revela que a introdução do tratamento de difusão ameniza e espalha consideravelmente as frentes de onda nas três salas.

O efeito do tratamento de difusão nas respostas impulsivas poderá ser visualizado na Figura 4(b). Fica óbvio que as respostas impulsivas tornaram-se mais densas e suavizadas quando comparadas com as respostas impulsivas das respectivas salas sem tratamento de difusão sonora (Fig. 4(a)).

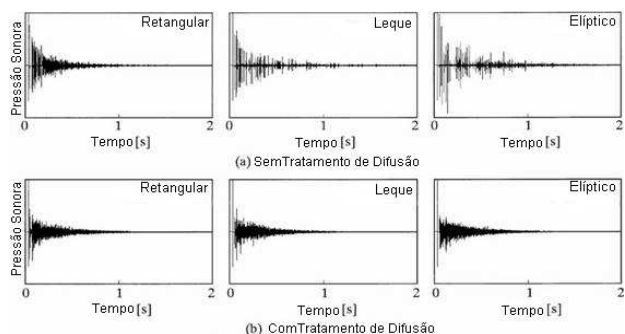


Figura 4: Respostas impulsivas calculadas nos receptores das Figuras 3 e 5, Fonte: [1]

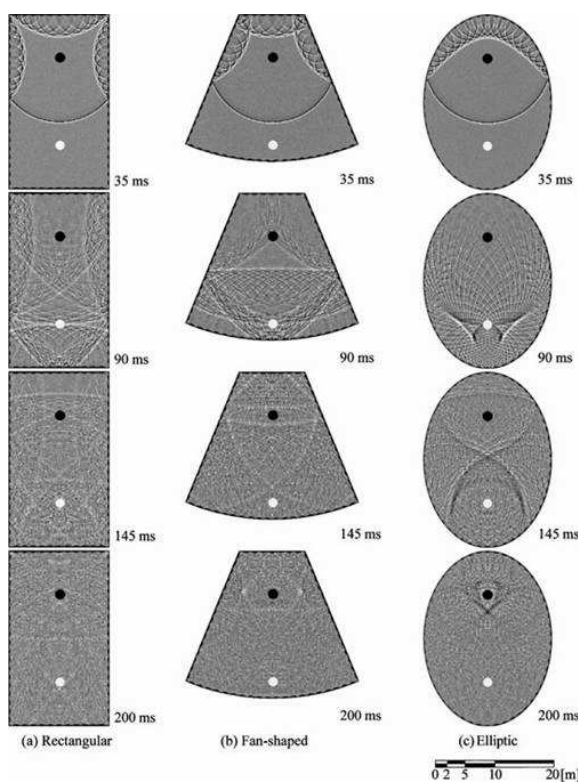


Figura 5: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica com tratamento de difusão sonora através de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6), Fonte: [1]

A Figura 6 ilustra o efeito de quatro diferentes tratamentos de difusão na sala retangular. Os resultados apresentados nesta figura são para os relevos esquematizados na parte inferior desta figura. Observa-se que o espalhamento depende das dimensões do relevo. Para o relevo Tipo 1, frentes de onda relativamente intensas e contínuas são ainda detectadas, havendo uma suavização progressiva com o tempo para os relevos Tipo 2 e 3. Observa-se claramente a eficácia do relevo Tipo 4 em amenizar as frentes de onda.

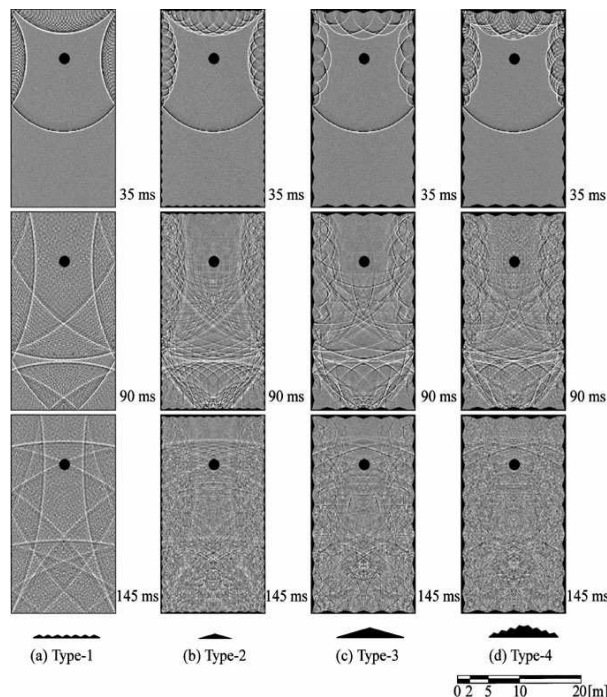


Figura 6: Propagação sonora na sala retangular com tratamento de difusão sonora, Fonte: [1]

#### 4. Avaliação visual do índice de difusão de superfícies

A Tabela 1 no final do artigo apresenta um quadro onde consta a classificação do índice de difusão de superfícies de 44 salas de concerto, obtidas por meio de inspeção visual do relevo das superfícies de paredes e teto destas salas. Como o quadro apresenta a compilação de 5 levantamentos realizados por diferentes autores, o índice de difusão de superfícies teve que ser normalizado numa escala de 0 a 1.

Observa-se que três salas apresentadas na Figura 1, e que são consideradas paradigmas de qualidade acústica, apresentam índice de difusão igual a 1, que é o valor máximo possível para este índice neste trabalho. A exceção ocorre para os resultados apresentados na terceira coluna, identificada como YH, com as três salas apresentando índice de difusão de apenas 0,3. Isto se deve ao fato de que estes resultados em particular foram obtidos tão somente por inspeção de tomadas fotográficas, e sem o acompanhamento e orientação dos avaliadores participantes do estudo.

#### 5. Caracterização de superfícies quanto ao som refletido

Dois coeficientes são empregados para caracterização do som refletido por superfícies: o coeficiente de difusão  $d$

e o coeficiente de espalhamento  $s$ . Conforme ilustra a Figura 7, o coeficiente de difusão é uma medida da uniformidade do som refletido pela superfície; e conforme ilustra a Figura 8, o coeficiente de espalhamento fornece a razão entre a energia refletida não especularmente, e a energia total refletida.

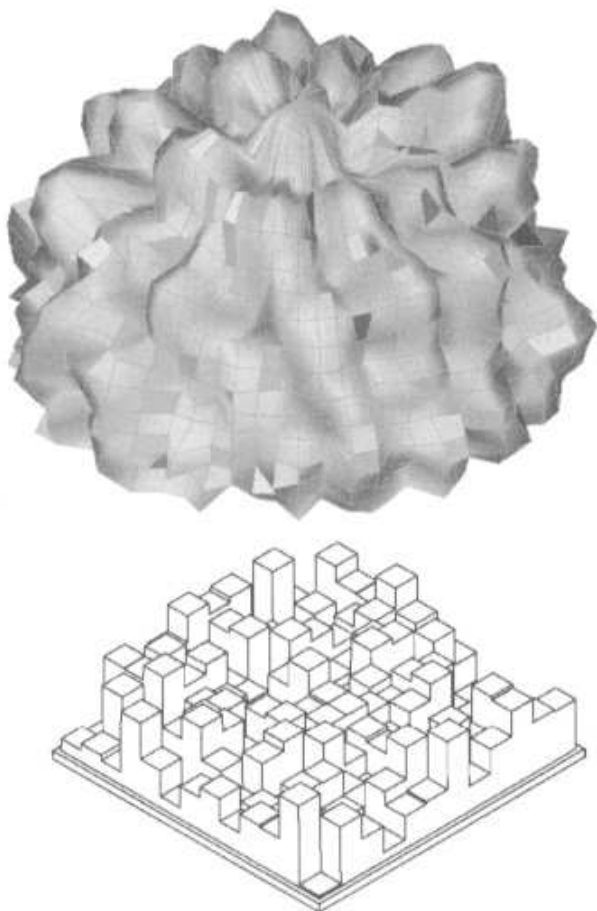


Figura 7: O coeficiente de difusão,  $d$ , caracteriza a uniformidade do som refletido pela superfície, Fonte: [4]

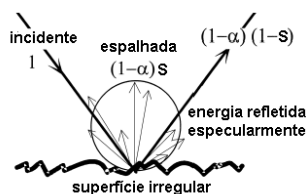


Figura 8: O coeficiente de espalhamento  $s$ , caracteriza a capacidade da superfície em remover energia da região especular, Fonte:[5]

O coeficiente de difusão poderá ser obtido através de um ensaio normalizado pela Audio Engineering Society por meio da norma AES-4id-2001 [3].

A função de autocorrelação é utilizada para medir a similaridade da energia espalhada no espaço. Uma superfície que espalha energia uniformemente, produzirá um alto valor da função de autocorrelação espacial; enquanto que uma superfície que concentra a energia refletida em uma dada direção gerará um baixo valor. A fim de obter-se um número único característico da superfície, calcula-se, para uma dada posição da fonte, o coeficiente de autocorrelação de difusão  $d_\psi$  por meio de:

$$d_\psi = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (1)$$

onde  $L_i$  é o  $i$ -ésimo nível de pressão sonora,  $n$  é o número de receptores na resposta polar, e  $\psi$  é o ângulo de incidência.

Conforme ilustra a Figura 9, as medições da resposta polar poderão ser feitas por meio de um goniômetro em 2D, em um semicírculo, ou em uma hemisfera, por meio de um goniômetro em 3D, em câmara anecoica. A escolha do goniômetro 2D/3D, depende do tipo de difusor. Quando a superfície produz espalhamento em um plano, a obtenção da resposta polar em um único plano é suficiente. Quando a superfície gera espalhamento em planos múltiplos, então uma avaliação hemisférica é necessária.

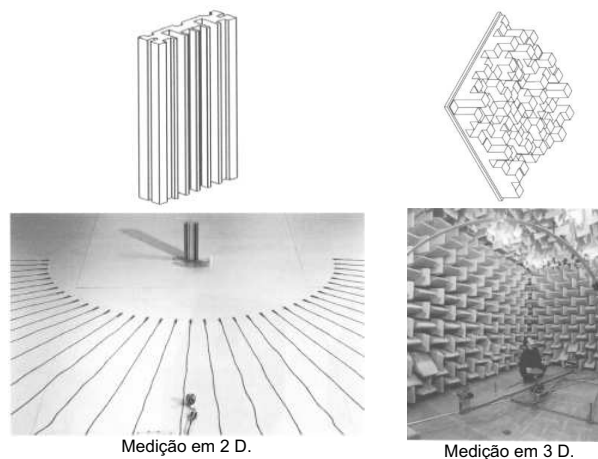


Figura 9: Determinação experimental do coeficiente de difusão em 2D e 3D, Fonte: [3]

A Figura 10 apresenta coeficientes de difusão em função da frequência de quatro superfícies. Observa-se nesta figura que, a exceção da superfície convexa, há uma marcante variação do coeficiente de difusão com a frequência para as outras três superfícies. Observa-se também que superfície plana nas baixas frequências, apresenta coeficiente de difusão próximo de 0,8; ou seja, a

primeira vista, a superfície plana poderia ser considerada um bom difusor em baixas frequências. No entanto, será mais adiante demonstrado que a resposta polar não é suficiente para caracterizar a capacidade de difusão de uma superfície. A superfície convexa apresenta coeficiente de difusão próximo de 1 em ampla faixa de frequências; ocorre que não se pode normalmente cobrir uma grande superfície com um único semicilindro.

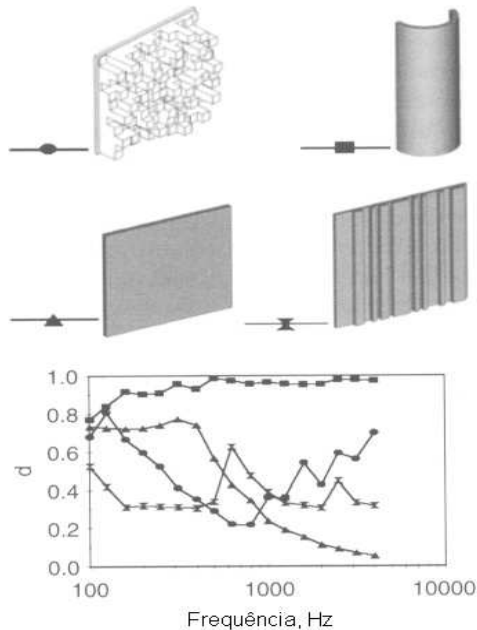


Figura 10: Variação do coeficiente de difusão com a frequência de algumas superfícies, Fonte: [7]

A Figura 11 apresenta o setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante segundo o procedimento normalizado pela ISO 17497-1 [6]. De acordo com esta norma, o coeficiente de espalhamento poderá ser obtido em escala real ou em um modelo em escala reduzida. A superfície sob teste é colocada sobre uma mesa giratória em uma câmara reverberante. Quando a superfície a ser testada é muito grande, existe problemas logísticos em fabricar-se uma mesa giratória compatível com as dimensões da amostra. Por exemplo, as portas da câmara reverberante serão provavelmente de dimensões que não permitem a colocação da mesa e da amostra na câmara. Por esta e outras razões, é preferível realizar os testes em modelos e câmaras em escala reduzida.

Já o coeficiente de espalhamento é obtido medindo-se o coeficiente de absorção para incidência aleatória  $\alpha$  e o coeficiente de absorção especular  $\alpha_s$  e empregando-se a

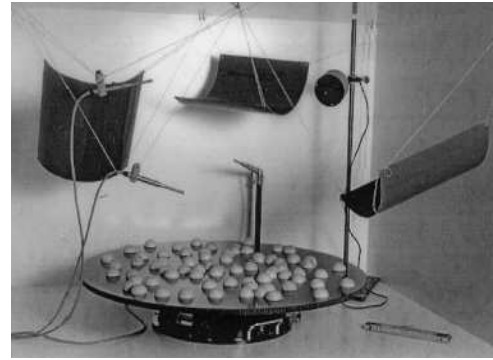


Figura 11: Setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante, Fonte: [5]

seguinte fórmula

$$s = \frac{\alpha_s - \alpha}{1 - \alpha} \quad (2)$$

Estes coeficientes de absorção são obtidos por meio das expressões (3a) e (3b), e medindo-se tempos de reverberação conforme Tabela 2.

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1) \quad (3a)$$

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3) \quad (3b)$$

Tabela 2: Condições da mesa e amostra durante as medições dos tempos de reverberação para determinação dos coeficientes de absorção e de espalhamento

Tempo de reverberação	Amostra	Mesa giratória
$T_1$	ausente	parada
$T_2$	presente	parada
$T_3$	ausente	girando
$T_4$	presente	girando

A Figura 12 apresenta a variação do coeficiente de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros, obtidos em uma câmara reverberante na escala de 1:10 (Figura 13).

## 6. Contrastando coeficiente de difusão e coeficiente de espalhamento

O coeficiente de espalhamento fornece resultados ambíguos quando a superfície é anisotrópica. A Figura 14 apresenta coeficientes de espalhamento em função da frequência de dois difusores: um difusor extrudado, conhecido como difusor de único plano, ou difusor 1D, por produzir espalhamento em um único plano, e um difusor que produz espalhamento em múltiplos planos, conhecido como difusor hemisférico.

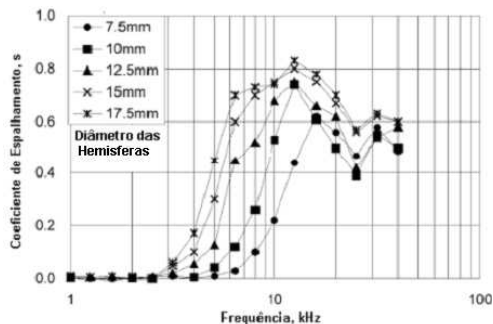


Figura 12: Coeficientes de espalhamento em função da frequência, Fonte: [8]



Figura 13: Câmara reverberante na escala de 1:10 utilizada na determinação dos coeficientes de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros, Fonte: [8]

Observa-se na Figura 14 que apesar de serem difusores bem diferentes, o comportamento do coeficiente de espalhamento em função da frequência é praticamente o mesmo para ambos difusores. O difusor 1D gera um coeficiente de espalhamento tão elevado quanto o difusor hemisférico a partir de 500 Hz, mesmo sendo tão somente um plano extrudado em uma única direção. Isto ocorre pois a topologia muda dramaticamente quando a superfície é girada durante o ensaio, e portanto esta superfície é vista como um bom difusor pelo coeficiente de espalhamento.

Enquanto que o coeficiente de difusão contém informações da capacidade que a superfície tem em espalhar som para todas as direções, o coeficiente de espalhamento não inclui nenhuma informação quanto à direção do som refletido. A Figura 15, apresenta o espalhamento gerado

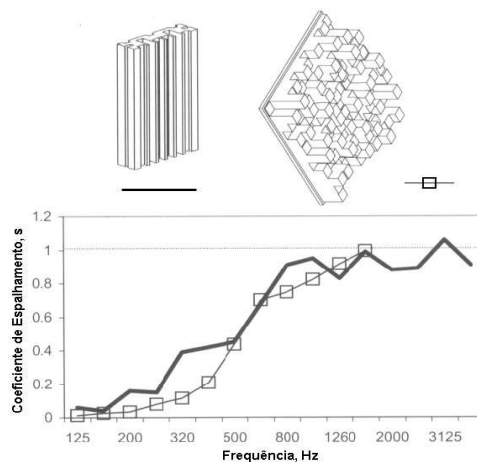


Figura 14: Coeficientes de espalhamento para dois difusores de diferentes geometrias. O difusor da esquerda é um difusor de único plano, o da direita é um difusor hemisférico, Fonte: [4]

por uma superfície plana, e por uma superfície plana que foi girada de 20°, no sentido de redirecionar a reflexão especular para uma outra direção. Observa-se que o coeficiente de difusão mede a capacidade de espalhamento de ambas as superfícies como sendo a mesma. Entretanto, o coeficiente de espalhamento "enxerga" o redirecionamento de energia como espalhamento, fornecendo portanto um alto coeficiente de espalhamento da superfície plana, a qual no entanto foi simplesmente girada, sem contudo ter-se conseguido dispersão - somente redirecionamento.

No projeto de difusores o objetivo maior é medir-se a capacidade que a superfície tem em espalhar som em todas as direções, e não de simplesmente medir-se a capacidade da superfície em remover energia da região especular. Desta forma, é importante para os projetistas de difusores, que o coeficiente que mede as características do som refletido, tenha condições de diferenciar redirecionamento de dispersão.

A base do coeficiente de espalhamento é a de separar o som refletido especularmente, do som espalhado em outras direções. Este coeficiente é de utilidade em programas de simulação acústica de salas que se baseiam nos princípios da acústica geométrica (traçado de raios, de cones, método das imagens especulares, etc.). Estes programas geralmente possuem algoritmos separados, um para lidar com as componentes especulares, e outro para lidar com as componentes espalhadas, no sentido de tornar a simulação mais condizente com a física do problema, e na tentativa de reduzir as incertezas das predições.

O coeficiente de espalhamento preocupa-se tão somente com a quantidade de energia que é removida da direção especular - este coeficiente não mede a qualidade da dispersão. Por esta razão, quando o objetivo é avaliar a qualidade do espalhamento, o coeficiente de difusão é o mais



adequado. No entanto, este coeficiente não deve ser utilizado indiscriminadamente nos programas de simulação baseados nos princípios da acústica geométrica, uma vez que o coeficiente de difusão é incompatível com os modelos de espalhamento de superfícies usado nos algoritmos destes programas.

A existência de dois coeficientes para medir as características do som refletido dá margem a muita confusão. Por isto, é importante que os interessados no assunto sejam educados quanto às diferenças, uma vez que o uso inadequado destes coeficientes poderá resultar em predições errôneas ou num mau projeto.

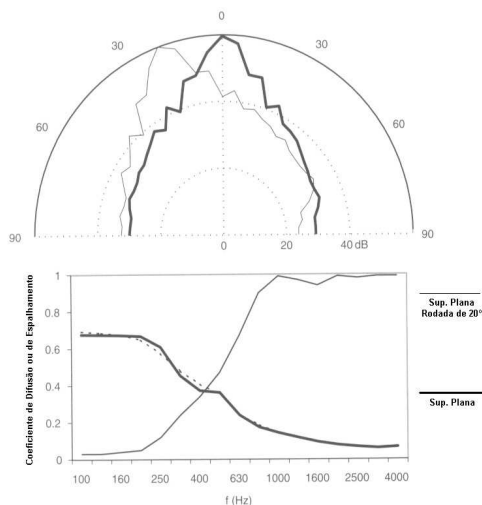


Figura 15: Em cima, resposta polar de uma superfície plana, e de uma superfície plana rodada de 20°. Embaixo, coeficientes de difusão e de espalhamento em função da frequência, Fonte: [9]

## 7. Resposta temporal e resposta em frequência de difusores

A Figura 16 apresenta construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder).

No caso da superfície plana, a frente de onda refletida permanece inalterada após a reflexão. Conseqüentemente, o som proveniente da fonte sonora é refletido integralmente de volta, sem dispersão, o que poderá gerar eco, particularmente se a fonte for um instrumento direcional como um trompete. No caso da superfície cilíndrica, a frente de onda refletida é agora semicircular, e que parece ter sido originada de uma fonte pontual no centro do semicilindro. Conseqüentemente, o semicilindro gera dispersão espacial. Ocorre que as frentes de onda são ainda muito ordenadas; assim, embora o semicilindro seja uma

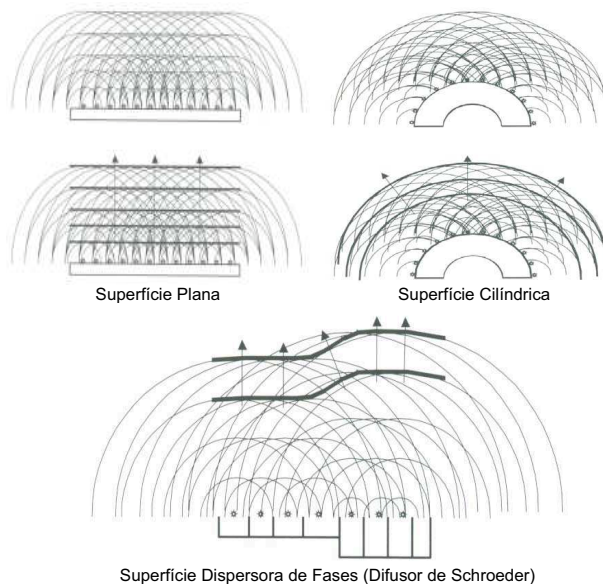


Figura 16: Construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder), Fonte: [10]

boa geometria para gerar dispersão espacial, não se trata do melhor difusor pois não produz dispersão temporal. Já o difusor de Schroeder altera a fase das frentes de ondas refletidas, e que além de gerar dispersão espacial, gera também dispersão temporal.

A Figura 17 ilustra a aplicação de difusores cilíndricos nas paredes laterais do Hummingbird Centre em Toronto. A reforma desta sala incluía a instalação de um sistema de reverberação artificial, que gerava reflexões por meio de alto-falantes montados nas paredes laterais. Ocorre que tais reflexões eram muitas vezes percebidas como ecos pela platéia. Como não fazia sentido eliminar os ecos com absorção, já que a absorção remove energia da sala, reduzindo a reverberação, a solução adotada foi a de promover dispersão do som lateral por meio de difusores cilíndricos.

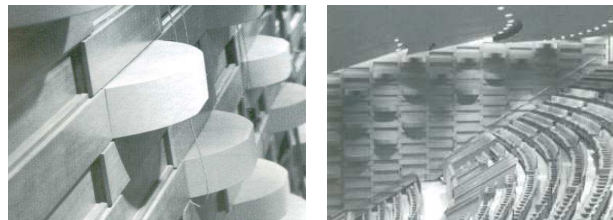


Figura 17: Tratamento das superfícies laterais do Hummingbird Centre, Toronto, com difusores cilíndricos, Fonte: [11]

A Figura 18 ilustra a resposta temporal de um difusor dispersor de fases, a qual é apresentada juntamente com a resposta espacial. A resposta temporal do difusor é caracterizada por uma série de reflexões ao longo do tempo. A resposta temporal é também conhecida como resposta impulsiva.



Figura 18: Resposta espacial e temporal de um difusor dispersor de fases, Fonte: [4]

O difusor pode também ser caracterizado pela resposta em frequência, obtida aplicando-se a transformada de Fourier na resposta impulsiva. A Figura 19, apresenta a resposta temporal e a resposta em frequência do campo sonoro total, som direto mais reflexão especular no primeiro caso, e som direto mais reflexão difusa no segundo caso.

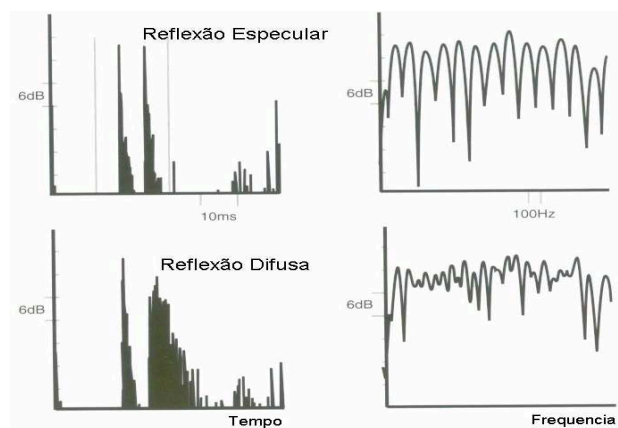


Figura 19: Resposta temporal e resposta em frequência do som direto combinado com reflexão especular e do som direto combinado com reflexão difusa, Fonte: [11]

No observador, ocorre uma combinação do som que provém diretamente da fonte, chamado de som direto, e do som refletido pela superfície. Quando o som direto combina-se com uma reflexão especular gerada por uma superfície plana, há formação do chamado filtro pente

(*comb filter*), conforme ilustra a Figura 19. O espaçamento entre as frequências está relacionado com o atraso, e a profundidade das cavas está relacionada com a amplitude relativa, do som direto e da reflexão especular. Este tipo de campo sonoro ocorre próximo a grandes paredes e refletores, quando não tratados com absorção ou difusão, e que dá origem ao chamado som "colorido" - ênfase de determinadas frequências em detrimento de outras.

Quando o som direto combina-se com uma reflexão difusa, a regularidade do filtro pente é minimizada, com redução dos níveis da resposta em frequência, conforme ilustra a Figura 19. O conteúdo espectral do som direto poderá ser mais bem percebido, e como originalmente produzido. Além de promover dispersão espacial, a redução do filtro pente é a principal razão do emprego de difusores em muitas aplicações.

Uma outra forma de gerar um difusor é através da combinação de reflexão com absorção. Adicionando-se placas de material absorvente em uma parede reflexiva, as fontes secundárias na região da parede coberta com material absorvente, gerando dispersão, conforme ilustra a Figura 20. Esta superfície, chamada de híbrida, produz dispersão modesta abaixo da frequência na qual a dimensão do painel é menor que a metade do comprimento de onda nesta frequência. Por outro lado, para obter-se reflexões em altas frequências, as dimensões dos painéis devem ser muito pequenas, sendo que a distribuição dos painéis torna-se importante. Superfícies híbridas são parcialmente absorventes, portanto só devem ser utilizadas em situações onde se necessita simultaneamente de controle da reverberação e de dispersão.

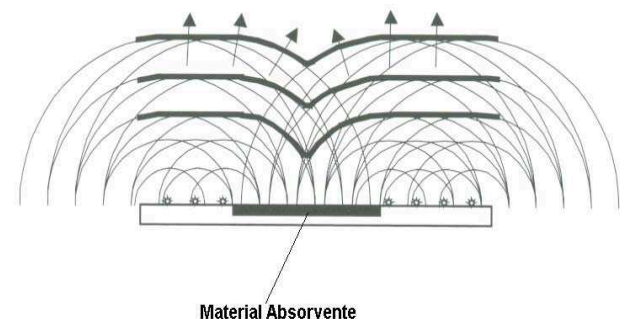


Figura 20: Construção aproximada de Huygen da reflexão de uma onda plana sobre uma superfície híbrida, Fonte: [4]

## 8. Campo próximo e campo afastado do difusor

Os resultados de medições da resposta polar dependem das distâncias da fonte e do receptor até a superfície, a menos que ambos, fonte e receptor, estejam no campo

afastado. (O campo afastado ocorre quando o som refletido cai de 6 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 3D, e de 3 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 2D.) Ocorre que, na maioria das salas, é comum que fontes e receptores estejam no campo próximo e não no afastado, a menos que a superfície seja muito pequena. A Figura 21 apresenta a resposta polar de uma superfície plana, para várias distâncias da superfície até o receptor. Observa-se nesta figura, que na resposta polar, uma superfície plana aparenta ser um bom difusor quando as medições são feitas próximas à superfície. Este comportamento parece contradizer a idéia que se tem de que uma superfície plana é um mau difusor. Ocorre que, conforme discutido anteriormente, a superfície plana não gera dispersão temporal, sendo esta a razão pela qual trata-se de um mau difusor. A resposta polar não revela a fase das frentes de onda.

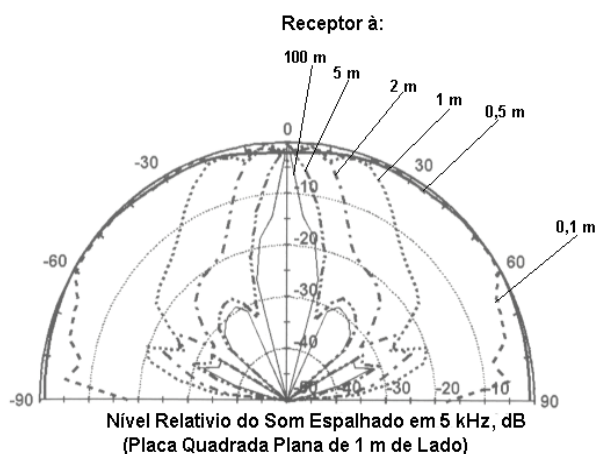


Figura 21: Efeito da distância do receptor na resposta polar de um painel quadrado de 1 m de lado. A fonte dista 100 m do painel, Fonte: [7]

Como no campo próximo a resposta polar varia com a distância, a solução normalmente adotada é a de medir-se a resposta polar de difusores no campo afastado, mesmo que esta distância seja maior que aquela onde os ouvintes estarão situados. A distância de campo afastado é normalmente adotada como aquela a partir da qual as diferenças de trajetórias entre pontos da superfície e o receptor, sejam pequenas quando comparadas com o comprimento de onda na frequência de interesse. Como em certos casos esta distância poderá ser muito grande, o que tornaria impraticável medições da resposta polar em câmara anecóica, a norma AES-4id-2001 [3] recomenda que a distância adotada nas medições poderá ser mais curta, porém garantindo que pelo menos 80 por cento dos ouvintes esteja fora da zona especular do difusor.

## 9. Modelos matemáticos para predição de espalhamento

No projeto e na caracterização de superfícies difusoras, torna-se necessário prever o campo sonoro refletido pela superfície. Atualmente isto é feito apenas considerando o espalhamento da superfície isoladamente, já que a predição na situação real de aplicação do difusor em uma sala, onde todas as suas superfícies são simultaneamente modeladas, requer tempo computacional excessivamente longo e capacidade de armazenamento muito grande.

Existem diversos modelos para predição do espalhamento de superfícies, desde os numericamente exatos porém computacionalmente intensos e lentos, até os rápidos porém que fornecem resultados com maior incerteza. A Tabela 3 apresenta modelos utilizados para predição do espalhamento de superfícies, juntamente com suas principais características.

Tabela 3: Modelos para predição do espalhamento de superfícies

Modelo	Exatidão	Tempo Computacional	Observações
Elementos de Contorno (BEM)	o melhor	o mais lento	Preciso contanto que as superfícies sejam de reação localizada e as perdas viscosas sejam pequenas. Lento, particularmente para superfícies grandes em altas frequências.
BEM p/ Painel Fino	↑	↑	Método eficiente para superfícies de pequena espessura, permitindo reduzir pela metade os elementos de um BEM padrão.
Kirchhoff	↓	↓	Utiliza as condições de contorno de Kirchhoff para aproximar pressões nas superfícies e portanto é muito mais rápido. Menor precisão em baixas frequências, e em superfícies com variações bruscas de impedância e de geometria.
Fresnel			Substitui a integração numérica do modelo de Kirchhoff por meio das integrais de Fresnel. Requer espalhamento ortogonal em duas direções sobre a superfície. Permite algumas simplificações para superfícies planas e curvas.
Fraunhofer ou Fourier	o pior	o mais rápido	Simplifica a integração numérica do modelo de Kirchhoff, sendo somente aplicável no campo afastado. Permite a aplicação dos modelos mais simples de Fourier. Bom para o entendimento dos fenômenos físicos, porém de pouca precisão.

O modelo de Fraunhofer, por ser o mais simples, é utilizado quando se deseja ter uma idéia do desempenho do difusor, sendo somente aplicável no campo afastado, quando ambos, fonte e receptor, estão longe da superfície.

O modelo de Fraunhofer é bem conhecido no campo da ótica e de processamento de sinais, e permite estimar rapidamente o espalhamento de uma superfície rígida e plana no campo afastado. No entanto este modelo será mais útil se for possível modificá-lo para possibilitar a análise de superfícies que não possuem coeficiente de reflexão unitário. Um exemplo, seria o de aplicá-lo na análise do difusor de Schroeder, o qual poderá ser modelado como uma superfície plana de impedância com fase variável. Quando este modelo é introduzido na solução de Fraunhofer, a expressão que permite obter a pressão sonora espalhada é dada por:

$$p_s(r) = -\frac{jk}{8\pi^2} e^{-jk(r+r_0)} \operatorname{sen} c \left( \frac{kb}{r} \right) (\cos \theta + 1) \cdot \int_{-a}^a R(r_s) e^{jkx_s \operatorname{sen} \theta} dx_s, \quad (4)$$

sendo que a Figura 22 ilustra um difusor de Schroeder com a geometria associada a esta equação.

Esta equação é essencialmente aquela usada por Schroeder [13] no projeto de difusores dispersores de fase. Costuma-se omitir o termo  $\cos \theta + 1$ , sendo que esta simplificação transforma a equação essencialmente numa transformada de Fourier, e é por este motivo que o modelo de Fraunhofer é também chamado de Fourier.

Por conveniência e por manter a compatibilidade com Schroeder, a solução de Fraunhofer/Fourier poderá ser reescrita na forma

$$|p(\theta, \psi)| \approx \left| A \int_S R(x) e^{jkx(\operatorname{sen} \theta + \operatorname{sen} \psi)} dx \right| \quad (5)$$

onde  $R(x)$  é o coeficiente de reflexão,  $\theta$  é o ângulo de reflexão,  $\psi$  é o ângulo de incidência,  $k$  é o número de onda, e  $A$  uma constante.

Nesta equação, a transformação não se dá nas variáveis mais familiares tempo-frequência da transformada de Fourier, e sim na variável  $kx$ , e que transforma-a na variável  $(\operatorname{sen} \theta + \operatorname{sen} \psi)$ . Quando se escolhe coeficientes de reflexão  $R(x)$  com espectro de potência plano com relação a  $kx$ , então a amplitude será constante com relação a variável transformada  $(\operatorname{sen} \theta + \operatorname{sen} \psi)$ . Isto não significa porém, que o espalhamento será constante em todas as direções, pois a transformada não é simplesmente função de  $\theta$  e  $\psi$ , e sim que o espalhamento se dará em lóbulos de mesma energia conforme será visto a seguir.

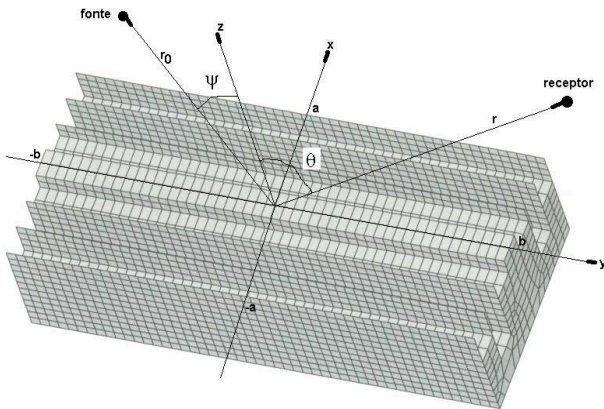


Figura 22: Difusor de Schroeder usado na solução de Fraunhofer/Fourier

## 10. Difusores de Schroeder

A Figura 23 apresenta um difusor de Schroeder de único plano ou difusor 1D. Este difusor consiste de uma série de poços de mesma largura e com diferentes profundidades. Os poços são separados por aletas. A profundidade dos poços é determinada por uma seqüência numérica, tal como uma seqüência de resíduos quadráticos (*quadratic residue sequence*). Difusores 1D apresentam um plano de dispersão máxima; já na direção ortogonal a este plano, a sua natureza extrudada faz com que este difusor se comporte essencialmente como uma superfície plana.

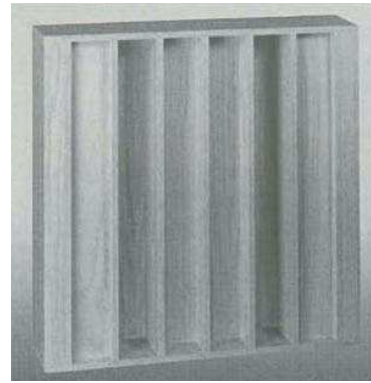


Figura 23: Difusor de Schroeder em 1D

A análise do difusor 1D é normalmente feita no plano de máxima dispersão, o qual corta o difusor na sua seção transversal. A Figura 24 ilustra a seção transversal de um difusor perfilado com uma seqüência de resíduos quadráticos, e que é conhecido como QRD (*quadratic residue difusor*).

A análise dos difusores de Schroeder é feita considerando-se uma onda plana incidente na direção  $y$ , no sentido contrário ao da orientação deste eixo na Figura 24. A onda plana é refletida no fundo dos poços, sendo que cada poço reflete uma onda na direção e sentido do eixo  $y$ . Assume-se que não há perdas de energia neste processo. A pressão em um ponto externo ao difusor será dada pela interferência das ondas que são irradiadas por cada poço. Todas estas ondas têm a mesma amplitude porém diferentes fases, pois a fase de cada uma delas é determinada pelo tempo que cada onda leva para ir até o fundo do poço que a gerou e voltar. Conseqüentemente, a distribuição polar do espalhamento é determinada pela escolha da profundidade dos poços.

Schroeder [13] mostrou que a escolha de uma seqüência de resíduos quadráticos, gera uma distribuição polar em lóbulos de mesma energia difratada. A Figura 25 apresenta o espalhamento gerado por um difusor de Schroeder, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. O espalhamento foi obtido com o modelo de

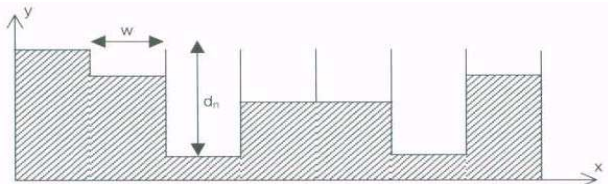


Figura 24: Seção transversal de um QRD

Fraunhofer/Fourier, onde se observa a geração de 11 lóbulos de mesma energia.

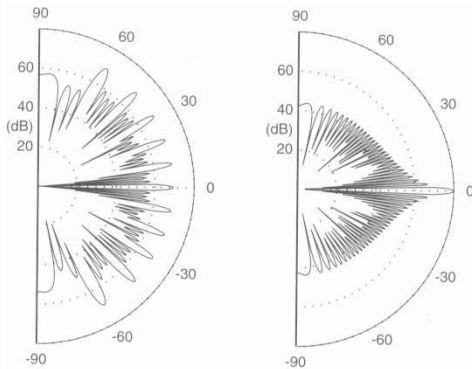


Figura 25: Espalhamento gerado por um difusor de Schroeder (à esquerda) e por uma superfície plana (à direita) de mesmas dimensões, Fonte: [4]

A aplicação do modelo de Fraunhofer/Fourier requer que ondas planas se propaguem nos poços. Conseqüentemente, o limite superior de freqüência  $f_{max}$  para que o espalhamento siga as predições do modelo requer que a largura  $w$  dos poços seja dada por:

$$w = \frac{\lambda_{min}}{2}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} \quad (6)$$

Acima de  $f_{max}$  o espalhamento continuará a ocorrer pois se trata de uma estrutura com geometria complexa. Portanto,  $f_{max}$  é apenas um limite de aplicabilidade da teoria, e não para ocorrência de espalhamento.

O modelo de ondas planas explica a necessidade de aletas separando os diferentes poços. O espalhamento não seguirá os resultados do modelo simplificado na ausência das aletas. Estas, por sua vez, devem ter a menor espessura possível, garantindo porém que não vibrem, o que poderá ocasionar perdas de energia.

Uma seqüência de resíduos quadráticos é a seqüência numérica mais comumente utilizada na determinação da profundidade dos poços dos difusores de Schroeder. Esta seqüência é obtida por meio de

$$s_n = n^2 \quad \text{mod} \quad N \quad (7)$$

onde  $\text{mod}$  indica o resto não negativo,  $N$  é o número primo gerador da seqüência, e que dá também o número de poços, e  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , é o número de ordem do poço.

Por exemplo, para o número primo  $N = 7$ , e para  $n = 5$ , a profundidade do sexto poço será dada por  $s_5 = 5^2 \text{ mod } 7$ . O modulo 7 significa que 7 é subtraído de 25 até que se obtenha resto não negativo. Em palavras, 7 é subtraído de 25 três vezes com resto 4. A profundidade do sexto poço é então proporcional ao numeral 4. A seqüência gerada com  $N = 7$  será então  $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ .

A Figura 26 apresenta um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

n	N						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13
18						1	2
19						0	16
20							9
21							4
22							1
23							0

Figura 26: Seqüência de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23. O perfil do difusor encontra-se ilustrado no rodapé de cada coluna, onde a profundidade de cada poço é proporcional à seqüência de números da respectiva coluna, Fonte: [12]

Os difusores de Schroeder atuam em freqüências múltiplas da freqüência de projeto. A freqüência de projeto é normalmente tomada como o limite inferior de atuação do difusor  $f_{min}$ . A profundidade do  $n$ -ésimo poço  $d_n$  é então determinada a partir da seqüência por meio de

$$d_n = \frac{s_n \lambda_{max}}{2N}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{max} = \frac{c}{f_{min}} \quad (8)$$

A freqüência de projeto não é a menor freqüência na qual o difusor gera mais espalhamento do que uma superfície plana, sendo apenas a menor freqüência onde a difração se dá ainda na forma de lóbulos de mesma energia. Difusores de Schroeder espalham diferentemente de superfícies planas uma ou duas oitavas abaixo da freqüência de projeto.

Os lóbulos de mesma energia aparecem no campo afastado em posições angulares  $\theta$  dadas por

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{Nw} - \sin \psi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (9)$$

onde  $m$  é o número de ordem do lóbulo.

Quando este resultado é substituído na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, na frequência de projeto, a seguinte expressão para a pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo:

$$\begin{aligned} |p_m| &= \left| A \int_S R(x) e^{j2\pi nm/Nw} dx \right| \\ &= \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

Para uma seqüência de resíduos quadráticos, a amplitude da pressão nos lóbulos será a mesma e dada por

$$|p_m| \propto \sqrt{N}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (11)$$

### 11. Periodicidade

Uma seqüência completa determina um período do difusor. A Figura 27 ilustra 2 períodos (e como dois períodos adjacentes se combinam) de um difusor de resíduos quadráticos baseado no número primo 17.

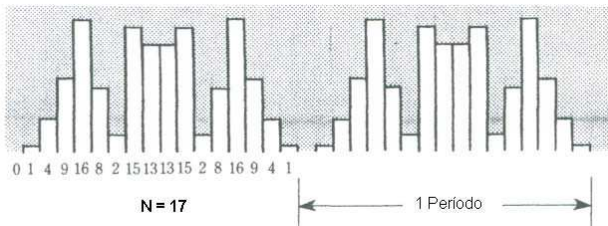


Figura 27: Dois períodos de um difusor de resíduos quadráticos gerado com o número primo 17, Fonte: [12]

O comprimento do período,  $Nw$ , é freqüentemente determinante do desempenho do difusor. Quando muito estreito, então, na frequência de projeto, haverá somente um grande lóbulo na resposta polar. Uma outra consequência do período estreito, é que nas primeiras freqüências múltiplas da frequência de projeto, o difusor se comporta como uma superfície plana. Este comportamento é ilustrado na Figura 28, a qual apresenta o espalhamento gerado por difusores com períodos de diferentes comprimentos. Ambos são QRDs com  $N = 7$ , e frequência de projeto de 500 Hz. A largura  $w$  dos poços é de 3 e 9 cm, o que fornece períodos com comprimento de 21 e 63 cm, respectivamente. Para uma comparação honesta, foi de 3 o número de períodos do difusor com menor largura de poço, de tal forma que a largura total dos dois difusores fosse a mesma e igual

a 63 cm. Para o difusor com largura de poços mais estreita, à direita da figura, o limite inferior de espalhamento é determinado pelo comprimento do período e não pela maior profundidade de poço, pois, em 1 kHz, o desempenho deste difusor é praticamente o mesmo de uma superfície plana de mesmas dimensões.

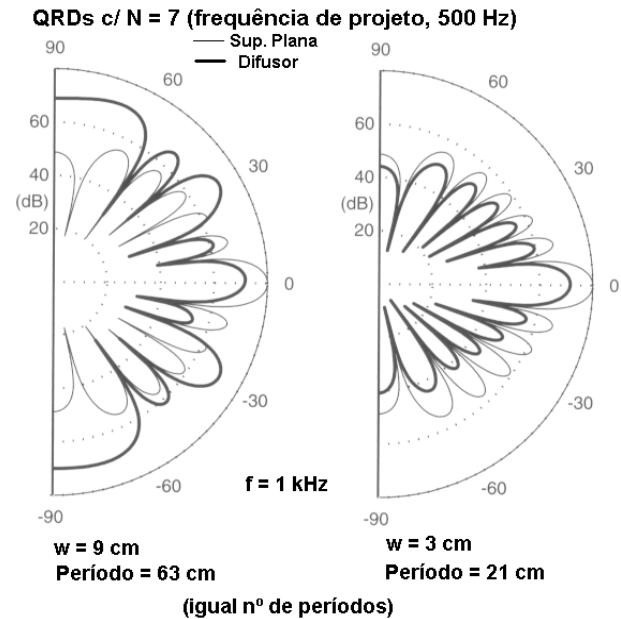


Figura 28: Diagramas polares em 1 kHz de dois QRDs com  $N = 7$ , de mesma largura total e frequência de projeto de 500 Hz, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões, Fonte: [4]

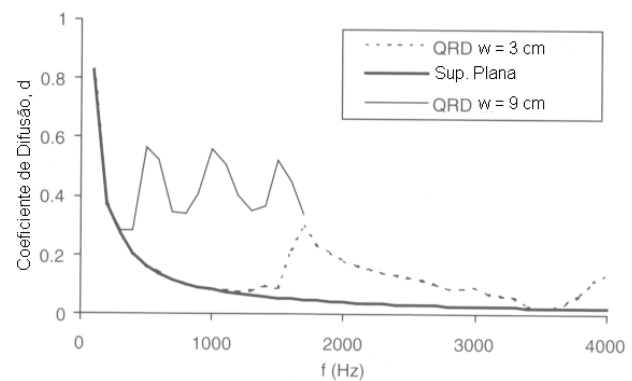


Figura 29: Variação do coeficiente de difusão de dois QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. A frequência de projeto dos dois difusores é 500 Hz, Fonte: [4]

A Figura 29 apresenta a variação do coeficiente de difusão destes QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões.

O QRD com largura de poços mais estreita só começa a espalhar mais do que a superfície plana a partir de 1,5 kHz - três vezes a frequência de projeto. Esta é aproximadamente a frequência onde aparece o primeiro lóbulo lateral na resposta polar, e portanto é a frequência a partir da qual um espalhamento mais significativo em direções oblíquas começa a ocorrer. Já para o QRD com maior largura de poços, o primeiro lóbulo lateral na resposta polar aparece abaixo da frequência de projeto e portanto espalhamento significativo já começa a ocorrer a partir da frequência de projeto de 500 Hz.

## 12. Otimização do projeto de QRDs

Para que um QRD desempenhe otimamente, deverá haver periodicidade. Os lóbulos são gerados pela periodicidade da superfície. Sem periodicidade, tudo o que as fórmulas de projeto garantem é o mesmo nível de espalhamento em certas direções. Este fato é ilustrado na Figura 30, que compara o espalhamento gerado por um difusor com diferentes períodos, onde se encontram indicadas as direções que apresentam níveis similares de espalhamento.

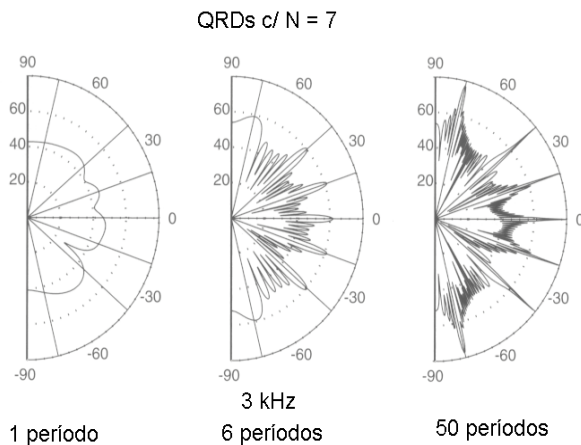


Figura 30: Espalhamento de QRDs com  $N = 7$  com diferentes períodos, Fonte: [4]

Observa-se nesta figura que os lóbulos laterais se estreitam à medida que o número de períodos aumenta, o que gera espalhamento irregular, pois há um grande número de posições angulares sem espalhamento. Assim, um projeto otimizado é aquele que atenda aos seguintes requisitos básicos:

- Um número relativamente pequeno de períodos, em torno de 5, para garantir a periodicidade necessária, e com lóbulos de difração não muito estreitos.
- Período de grande comprimento para assegurar um grande número de lóbulos laterais, o que implica num valor de  $N$  relativamente grande, o que é preferível,

pois largura de poços  $w$  grande pode produzir reflexões especulares em altas frequências.

- Pode parecer que a largura de poços  $w$  deva ser a menor possível para que o difusor cubra uma ampla faixa de frequências. Porém, há outras considerações que limitam a estreiteza dos poços:
  1. custo e dificuldade de fabricação e
  2. absorção devido a efeitos viscosos.
 Conseqüentemente a recomendação é adotar a largura dos poços  $w$  entre 2,5 e 5 cm.
- Normalmente, por questões de espaço, é de interesse limitar a profundidade dos poços do difusor. Para uma dada profundidade máxima  $d_{max}$  a frequência mínima de atuação do QRD  $f_{min}$  (frequência de projeto), é dada por  $f_{min} = cs_{max}/2Nd_{max}$ . Então a razão entre o maior número da seqüência  $s_{max}$  e o número primo gerador da seqüência  $N$ ; ou seja  $s_{max}/N$ , determina o limite de baixa frequência de atuação do QRD. Por exemplo:  $N = 7$ ,  $s_{max}/N = 4/7$ ;  $N = 13$ ,  $s_{max}/N = 12/13$ . Conseqüentemente, um QRD com  $N = 7$ , fornecerá um limite de baixa frequência aproximadamente uma oitava abaixo do QRD com  $N = 13$ . No sentido de reduzir este limite mantendo  $N$  grande, o que é desejável, é possível manipular a seqüência, introduzido um deslocamento de fase constante  $m$  na fórmula recursiva; ou seja:

$$s_n = (n^2 + m) \mod N, \quad m = \text{inteiro cte.} \quad (12)$$

Considerando dois QRDs com  $N = 13$ , obtém-se:

$$m = 0,$$

$$s_n = \{0, 1, 4, 9, 3, 12, 10, 10, 12, 3, 9, 4, 1\},$$

$$\frac{s_{max}}{N} = 12/13;$$

$$m = 4,$$

$$s_n = \{4, 5, 8, 0, 7, 3, 1, 1, 3, 7, 0, 8, 5\},$$

$$\frac{s_{max}}{N} = 8/13.$$

Conseqüentemente, a frequência de projeto foi rebaixada de 1/3 com a introdução da fase  $m$ . No entanto, convém lembrar que esta melhoria de desempenho em baixas frequências poderá não ocorrer caso o comprimento do período seja curto.

- Nas frequências críticas dadas por  $mN$ , com  $m = 1, 2, 3, \dots$ , o QRD se comporta como uma superfície plana pois os poços irradiam em fase nestas frequências. Estas são frequências para as quais os comprimentos de onda são múltiplos inteiros da frequência de projeto. A Figura 31 mostra o espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz, quando o QRD se comporta como uma superfície plana. A fim de evitar-se estas frequências críticas, é necessário que a primeira frequência crítica esteja acima da fre-

quência máxima de atuação do QRD, o que requer  $N \gg c/2wf_{min}$ .

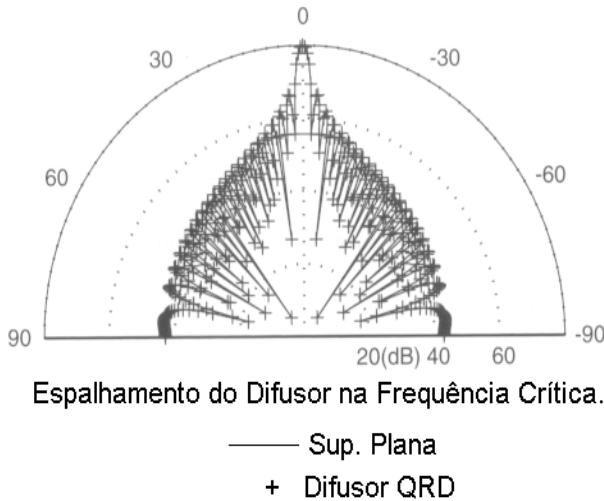


Figura 31: Espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz, Fonte: [4]

### 13. Outras Sequências

#### 13.1. Sequências de Comprimento Máximo, MLS

Schroeder [13] iniciou seus trabalhos na área de difusores estudando o espalhamento com a sequência de comprimento máximo MLS (*maximum-length sequence*). Um sinal MLS é um sinal aparentemente aleatório, obtido de certas sequências binárias compostas de 0 e 1. O sinal MLS é utilizado na criação de ruído pseudo-aleatório e apresenta espectro de potência plano. Esta característica é que torna a MLS atraente na geração de perfis de difusores.

Uma MLS de ordem  $n$  é periódica com período  $N$  dado por  $N = 2^n - 1$ . Existem diferentes MLS de mesma ordem. A Figura 32 ilustra a seção transversal de um difusor formado com uma MLS com período  $N = 7$ , por meio da sequência  $\{1, 1, 0, 1, 0, 0, 0\}$ .

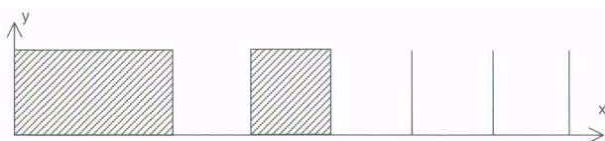


Figura 32: Seção transversal de um difusor formado com sequência de comprimento máximo, MLS, com período  $N = 7$ , Fonte: [4]

Quando, na frequência de projeto, a profundidade dos poços é igual a  $1/4$  do comprimento de onda, os coeficientes de reflexão  $R_n$  serão  $\{1, 1, -1, 1, -1, -1, -1\}$ . Substituindo estes coeficientes de reflexão na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, para a pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo

$$|p_m| = \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| \quad (13)$$

$$= \begin{cases} A, & m = 0, \pm N, \pm 2N \\ A\sqrt{N+1}, & \text{outros casos} \end{cases}$$

Ou seja, os lóbulos laterais ( $|m| > 0$  &  $|m| < N$ ) têm o mesmo nível, sendo que o lóbulo principal de ordem zero ( $m = 0$ ) está desnivelado de  $-10 \log(N + 1)$ . A Figura 33 apresenta o espalhamento na frequência de projeto (profundidade do poço igual a  $1/4$  do comprimento de onda nesta frequência), de um difusor MLS com período  $N = 7$  comparativamente com uma superfície plana. Na frequência de projeto se formam 5 lóbulos, com o lóbulo central desnivelado de  $-10 \log(8) = -9$  dB. Uma oitava acima da frequência de projeto, quando o comprimento de onda é igual à metade da profundidade do poço, o difusor se comporta como uma superfície plana, com todas as ondas sendo irradiadas com a mesma fase, sendo então esta a frequência crítica do difusor. Conseqüentemente, o difusor MLS só é útil numa banda de oitava. Esta é uma limitação do difusor MLS.

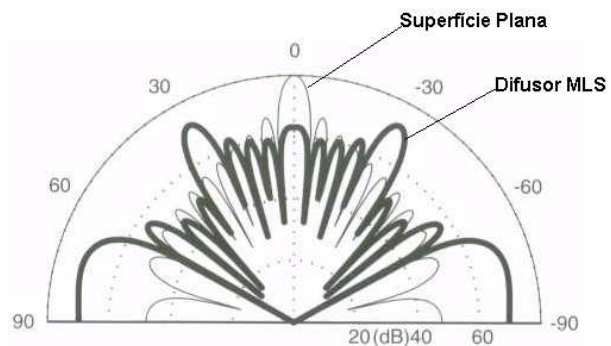


Figura 33: Espalhamento, na frequência de projeto, de um difusor MLS com 5 períodos e com  $N = 7$ , comparativamente com uma superfície plana, Fonte: [4]

#### 13.2. Sequências de Raízes Primitivas

A sequência de raiz primitiva (*primitive-root sequence*) é obtida por meio de

$$s_n = r^n \pmod{N}, \quad n = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (14)$$

onde mod indica o resto não negativo,  $N$  é o número primo gerador da sequência,  $r$  é a menor raiz primitiva de  $N$ , sendo que o difusor terá  $N - 1$  poços.



Uma raiz primitiva é aquela para a qual a seqüência gerada é única sendo seus elementos compostos por todos números inteiros compreendidos entre 1 e  $N - 1$ . Por exemplo,  $N = 7$  tem 3 como raiz primitiva, e assim  $s_n = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\}$ , que é uma seqüência que contém todos os inteiros entre 1 e 6.

O difusor perfilado com base numa seqüência de raízes primitivas (*primitive-root diffusor* PRD), tem como característica a redução da energia refletida na direção especular, além é claro, de gerar lóbulos de mesma energia em outras direções. Assim como ocorre com o QRD, o PRD apresenta estas características em freqüências múltiplas da freqüência de projeto. Nestas freqüências, a amplitude do som refletido na direção especular é reduzida de  $20 \log(N - 1)$  com relação à superfície plana. Deve-se observar no entanto, que qualquer superfície com poços, reduz a energia refletida na direção especular, contanto que a profundidade dos poços seja da ordem de grandeza do comprimento de onda na freqüência de interesse. Quando uma seqüência de profundidades é introduzida na superfície, ocorre interferência destrutiva entre as ondas irradiadas pelos poços.

A reflexão especular de um PRD se reduz à medida que  $N$  aumenta. Este fato é demonstrado na Figura 34 onde se compara o campo espalhado de dois PRDs com uma superfície plana. Um grande número de poços, entre 20 e 30, é necessário para que uma redução significativa comece a ocorrer na direção da reflexão especular.

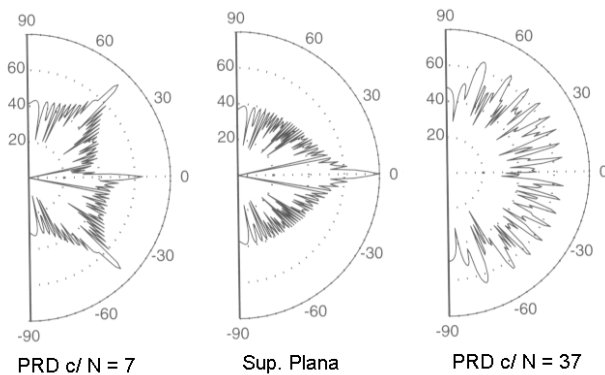


Figura 34: Espalhamento de dois PRDs e de superfície plana, Fonte: [4]

A pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo é aproximadamente dada por

$$|p_m| = \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi n m / N} \right| \quad (15)$$

$$= \begin{cases} A, & m = 0, \pm N, \pm 2N \\ A\sqrt{N}, & \text{outros casos} \end{cases}$$

## 14. Difusores multidimensionais

Os difusores apresentados até aqui foram do tipo de único plano, ou difusores 1D. Estes difusores geram espalhamento em um hemi-disco, se comportando como superfícies planas em direções ortogonais. Embora estes difusores sejam os mais comuns, em certas situações há necessidade de se recorrer a difusores que gerem espalhamento hemisférico. Estes difusores podem ser formados combinando um difusor de Schroeder da direção  $x$ , com outro na direção  $y$ , e portanto haverá lóbulos de mesma energia em uma hemisfera. A Figura 35 apresenta um exemplo de uma superfície assim formada.

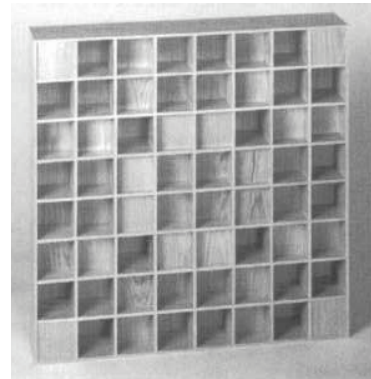


Figura 35: Difusor de Schroeder em 2D

O difusor 2D produz espalhamento em diversos planos. Um difusor 2D de dimensões  $Nw \times Nw$  tem o quadrado do número de lóbulos do difusor 1D de comprimento  $Nw$ . Ocorrerá porém, redução de energia dos lóbulos do difusor 2D de  $10 \log(m)$  quando comparado com o difusor 1D com  $m$  lóbulos.

A seqüência para formação de um QRD em 2D é dada por

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \mod N \quad (16)$$

onde  $n$  e  $m$  são inteiros, e que fornecem a profundidade do poço de ordem  $(n, m)$ .

Similarmente, um PRD em 2D poderá ser formado por meio da seqüência

$$s_{n,m} = (r^n + r^m) \mod N. \quad (17)$$

É também possível adotar uma seqüência de resíduos quadráticos em uma direção e uma seqüência de raízes primitivas na direção ortogonal, contanto que ambas sejam geradas pelo mesmo número primo  $N$ , muito embora não tenham ainda sido reveladas as vantagens deste procedimento.

A versão 2D de um QRD com  $(2 \times 2)$  períodos, baseado em  $N = 7$ , é apresentada na Figura 36. Nesta concepção,

os índices  $n$  e  $m$  iniciaram-se em 4, com objetivo de colocar o 0 no centro de cada período. Como a seqüência é periódica, é possível iniciar os índices  $n$  e  $m$  a partir de qualquer número da seqüência. Difusores 2D geralmente apresentam menor eficiência em baixas frequências quando comparados com difusores 1D, pois a razão  $s_{max}/N$  tende a 1 nos dispositivos 2D.

O difusor da Figura 36 também ilustra o fato que diferentes ordenamentos podem ser utilizados com os números da seqüência. A seguinte seqüência aparece na diagonal do período (1, 1) do difusor  $\{4, 1, 2, 0, 2, 1, 4\}$ , enquanto que a seqüência original é  $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ . Observa-se que foram utilizados nesta diagonal, cada quarto elemento da seqüência original. Esta nova seqüência tem as mesmas propriedades de Fourier da seqüência original, devido à propriedade de deslocamento (*shift property*) das seqüências de resíduo quadrático. Isto implica em boa difusão não somente em direções ortogonais, como também nas direções das diagonais do difusor.

4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6	6	6	1	5	4	5	1
4	6	3	2	3	6	4	4	4	6	3	2	3	6
4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6	6	6	1	5	4	5	1

Figura 36: QRD em 2D, com  $N = 7$  e  $(2 \times 2)$  períodos, com destaque de um dos períodos, Fonte: [4]

A Figura 37 apresenta o espalhamento hemisférico, na frequência igual a quatro vezes a frequência de projeto, de um QRD em 2D com  $N = 7$ , comparativamente com uma superfície plana. O espalhamento hemisférico da superfície plana é conhecido como *banana polar*.

Finalmente cabe tentar elucidar a contradição de projetar-se e avaliar-se as características do espalhamento de difusores no campo afastado, quando os ouvintes estão normalmente no campo próximo do difusor. Esta abordagem não é tão limitadora como aparenta ser, pois há evidências de que um difusor capaz de criar boa dispersão no campo afastado, também o fará no campo próximo. No campo próximo, as diferenças de trajetórias de diferentes

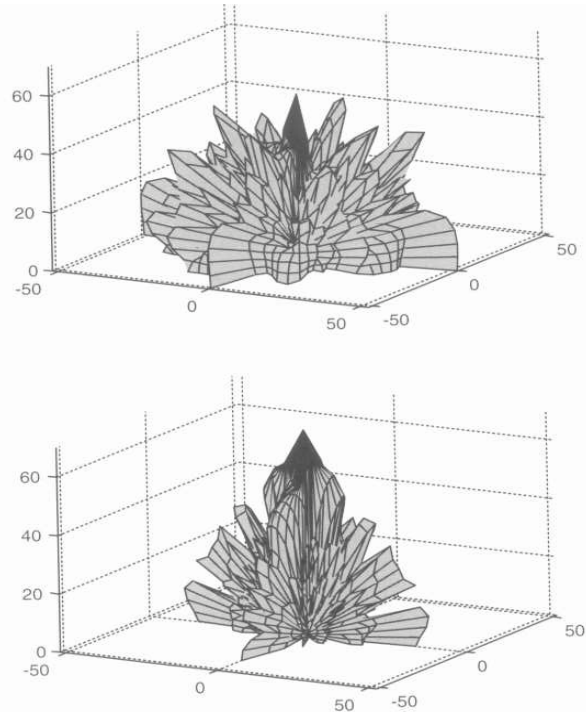


Figura 37: Empalhamento de difusor QRD em 2D com  $N = 7$  (em cima), comparativamente com uma superfície plana (embaixo), Fonte: [4]

pontos da superfície até o observador controlam o espalhamento, fazendo com que apareçam um grande número de mínimos e máximos na resposta polar. Em realidade, os diagramas polares no campo próximo de diferentes difusores apresentam características estatísticas similares. Alguns estudos compararam difusores com arranjos periódicos e aperiódicos, tanto subjetiva como objetivamente, situando os ouvintes em posições realistas no campo próximo. Observou-se então que os arranjos aperiódicos, que geram mais dispersão no campo afastado do que os arranjos periódicos, se mostraram difusores mais eficientes no campo próximo. Conseqüentemente, assume-se que difusores de Schroeder, que criam boa dispersão no campo afastado, serão também eficazes no campo próximo.

## 15. Difusão nas salas modernas

A Figura 38 apresenta algumas salas modernas, com destaque para o tratamento de difusão sonora.

**Beethovenhalle**, Bonn, 1959,  $TR = 1,7$  s (arquiteto S. Wolske; consultores acústicos Meyer e Kuttruff). Tratamento de difusão no teto por meio de uma densa combinação de hemisferas, pirâmides e cilindros truncados, projetando-se em torno de 30 cm. Paredes laterais recobertas com cilindros verticais atrás de telas acusticamente transparentes. Sala com o mais explíc-

ito tratamento de difusão, o que gerou absorção indesejada e o um tempo de reverberação de apenas 1,7 s.

**Philharmonie**, Berlin, 1963,  $TR = 2,0$  s (arquiteto H. Scharoun; consultor acústico Cremer). Sala com terraços (*vineyard terraces*), que oferecem muitos planos refletores. O teto cilíndrico em forma de tenda, e difusores piramidais nas partes mais baixas do teto promovem a necessária difusão. As pirâmides possuem aberturas de tal forma a funcionarem também como ressoadores de Helmholtz, a fim de limitar a reverberação de baixa frequência.

**Neues Gewandhaus**, Leipzig, 1981,  $TR = 2,0$  s. Substituto do aclamado Gewandhaus original, bombardeado num raid aéreo em 1944. O novo Gewandhaus, com terraços, tem teto formado por painéis difusores cilíndricos.

**Michael Fowler Centre**, Wellington, 1983,  $TR = 2,0$  s (arquitetos Warren e Mahoney; consultores acústicos Marshal e Hyde). Esta foi a primeira sala a usar difusores de Schroeder (QRDs) nos painéis do teto e parte superior das paredes. Estudos subjetivos indicavam que a difusão se torna efetiva subjetivamente a partir dos 350 Hz, aproximadamente. Daí então a frequência de projeto de 500 Hz dos difusores utilizados nesta sala.

**Kyoto Concert Hall**, Kyoto, 1995,  $TR = 2,0$  s (arquiteto Arata Isozaki Atelier, consultoria acústica Nagata Acoustics). Projetado como um *shoe-box* típico, com teto e parte inferior das paredes revestidas com elementos difusores testados na escala de 1:10.

**Walt Disney Concert Hall**, Los Angeles, 2003,  $TR = 2,0$  s. (arquiteto Frank O.Gehry, consultoria acústica Nagata Acoustics). Com um custo final de US\$ 274 milhões, o prédio que abriga esta sala é todo em aço inoxidável. Sala com tetos formados por grandes superfícies convexas, o que confere alta difusão devido às boas características de espalhamento de grandes superfícies cilíndricas.

## 16. Conclusões

O estado da arte de difusores encontra-se atualmente em estágio bastante avançado. Entretanto, não se encontram ainda bem caracterizados os efeitos psicoacústicos da difusão, bem como até que ponto a qualidade acústica das salas dela depende. Desconhece-se ainda o grau de difusão necessário conforme o tipo de sala, desde pequenas salas de aula e estúdios de gravação de áudio, até grandes salas de acordo com o programa – salas de teatro, ópera, concerto inclusive.

## Referências

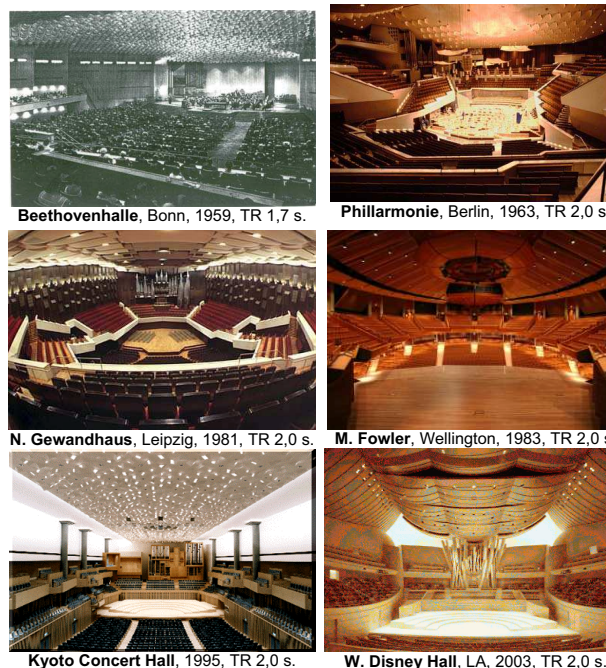


Figura 38: Algumas salas modernas com destaque para o tratamento de difusão sonora

- [1] Yokota, T.; Sakamoto S.; Tachibana H.: *Visualization of sound propagation and scattering in rooms*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo
- [2] Fricke F.R.: *Visual assessments of the surface diffusion properties of concert halls*, **Applied Acoustics**, **60(2)**, 253-261, 2000
- [3] AES-4id-2001, *AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - characterization and measurement of surface scattering uniformity*, **J. Audio Eng. Soc.**, **49(3)**, 149-165, 2001
- [4] Cox, T.J.; D'Antonio P.: *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*, Spon Press, London, 2004
- [5] Mommertz, E.; Vorländer M.: *Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients*, **Applied Acoustics**, **60(2)**, 187-199, 2000
- [6] ISO 17497-1: *Acoustics Measurement of the sound scattering properties of surfaces - Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*
- [7] Hargreaves, T.J.; Cox, T.J.; Lam, Y.W.; D'Antonio, P.: *Surface diffusion coefficients for room acoustics: free field measures*, **J. Acoust. Soc. Am.**, **108(4)**, 1710-1720, 2000
- [8] Jeon, J.Y.; Lee S.C.; Vorländer, M.: *Development of scattering surfaces for concert halls*, **Applied Acoustics**, **(65)**, 341-355, 2004
- [9] Cox, T.J.; D'Antonio, P.: *Contrasting surface diffusion and scattering coefficients*, **Proc. 17th ICA**, 6B.09.01, Italy, 2001
- [10] Cox, T.J.; D'Antonio, P.: *Engineering art: the science of concert hall acoustics*, **Interdisciplinary Science Reviews**, **26(2)**, 119-129, 2003
- [11] D'Antonio, P.; Cox, T.J.: *Diffusor applications in rooms*, **Applied Acoustics**, **60(2)**, 113-142, 2000
- [12] Everest, F.A.: *The Master Handbook of Acoustics*, TAB Books, Imprint of McGraw-Hill, New York, 1994
- [13] Schroeder, M.R.: *Diffuse sound reflection by maximum-length sequences*, **J. Acoust. Soc. Am.**, **57(1)**, 149-150, 1975.

Tabela 1: Cinco avaliações de índices de difusão de superfícies em 44 salas de concerto, [2]

Five visual assessments of the surface diffusivity indices of concert halls<sup>a</sup>

Name of hall	SDI				
	FF	SC	YH	CH	LB
Festspielhaus, Salzburg, Austria	0.8	1	0.5	0.8	1
Grosser Musikvereinsaal, Vienna, Austria	0.8	1	0.3	1	1
Palais des Beaux-Arts, Brussels, Belgium	0.5	0.5	0.5	0.3	
Radiohuset Studio 1, Copenhagen, Denmark	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5
Tivoli Koncertsal, Copenhagen, Denmark	0.5	0.5	0.3	0.5	
Carl Nielsen Hall, Odense, Denmark	0.5	0.5	0.3	0.5	
National Concert Hall, Dublin, Eire	1	1	0.3	0.5	
Berliner Philharmonie Hall, Berlin, Germany	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8
Beethovenhalle, Bonn, Germany	0.8	0.8	0.5	0.3	
Gewandhaus, Leipzig, Germany	0.5	0.5	0.5	1	
Herkulesaal, Munich, Germany	0.5	0.5	0.3	0.8	
Gasteig Philharmonie Hall, Munich, Germany	1	1	0.8	0.5	0.8
Liederhalle, Beethovensaal, Stuttgart, Germany	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5
Frederic R. Mann Auditorium, Tel Aviv, Israel	0.5	0.3			0.5
Concertgebouw, Amsterdam, Netherlands	1	1	0.3	1	1
Concert Hall De Doelen, Rotterdam, Netherlands	1	0.8	0.5	1	1
Music Center, Utrecht, Netherlands	0.8	0.8	0.5	0.3	
Berwald Hall, Stockholm, Sweden	0.8	0.8	0.3	0.5	
Stadt-Casino, Basel, Switzerland	0.8	1	0.3	0.8	0.8
Grosser Tonhallesaal, Zurich, Switzerland	0.8	1	0.5	0.8	1
Colston Hall, Bristol, UK	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3
St. David's Hall, Cardiff, UK	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5
Usher Hall, Edinburgh, UK	0.8	0.8	0.3	0.5	
Philharmonic Hall, Liverpool, UK	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5
Royal Festival Hall, London, UK	0.8	0.5	0.5	0.3	0.5
Barbican Concert Hall, London, UK	0.8	0.5	0.5	0.3	0.3
Derngate Centre, Northampton, UK	0.8	0.8	0.3	0.5	
Royal Concert Hall, Nottingham, UK	0.5	0.5	0.5	0.5	
Free Trade Hall, Manchester, UK	0.5	0.5	0.3	0.5	
Lyric Theatre, Baltimore, USA	0.5	0.5	0.3	0.8	
Boston Symphony Hall, Boston, USA	1	1	0.3	1	1
Orchestra Hall, Chicago, USA	0.5	0.5	0.3	0.5	
Severance Hall, Cleveland, USA	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8
Boettcher Concert Hall, Denver, CO, USA	0.5	0.5	0.5	0.3	
Avery Fisher Hall, New York, USA	1	0.8	0.3	0.3	0.8
Carnegie Hall, New York, USA	0.8	0.8	0.5	0.8	
Academy of Music, Philadelphia, USA	0.8	1	0.5	0.5	
Eastman Theatre, Rochester, New York, USA	0.8	0.8	0.3	0.5	
L. M. Davies Symphony Hall, San Francisco, USA	1	1	0.5	0.8	0.8
War Memorial Opera House, San Francisco, USA	0.5	0.5	0.5	0.5	
The Grand Hall, Worcester, MA, USA	1	1	0.3	0.8	0.8
Roy Thomson Hall, Toronto, Canada	0.8	1	0.5	0.3	
Concert Hall, Sydney Opera House, Australia	1	1	0.5	0.5	
The Melbourne Concert Hall, Melbourne, Aust.	0.5	0.5	0.5		

<sup>a</sup> FF, Fricke's assessments; SC, Clarke's assessments; YH, the five-category, modified Han assessments; CH, Haan's assessments; LB, the five-category, modified Beranek assessments.

# Inarmonicidade e afinação de pianos

Goldemberg, R.

Instituto de Artes/Departamento de Música, Universidade Estadual de Campinas, rgoldem@iar.unicamp.br

## Resumo

Este trabalho tem o propósito de explanar os princípios físicos que regem a distribuição de frequências em escala de pianos acústicos e os compromissos adotados pelos construtores às suas inadequações. Inicialmente, são abordadas as leis físicas que regem o funcionamento de cordas vibrantes e os problemas oriundos pela existência de rigidez ou tenacidade quando percutidas. Estes efeitos são avaliados em termos de inarmonicidade, ou seja, o desvio de uma série harmônica ideal. Em seguida, discutem-se os critérios de temperamento comumente adotados para o espaçamento da escala cromática na atualidade e a conseqüente distribuição de "erros" na afinação. Por fim, apresenta-se a lógica e os critérios adotados por técnicos proficientes na ajustagem precisa das notas e escala em pianos e instrumentos similares.

PACS no.

## 1. Som, timbre e série harmônica

Um estímulo sonoro pode ser percebido quando um objeto vibra em determinadas frequências. As pequenas flutuações localizadas que um objeto vibratório provoca na atmosfera ao seu redor produzem ondas sonoras que se propagam pelo ar. No caso destas ondas atingirem um ouvido humano, o movimento vibratório é transmitido de forma mecânica para o tímpano, uma fina e sensível membrana que se encontra no canal auditivo. A partir daí, mecanismos neuro-transmissores entram em ação e enviam a informação para o cérebro, que a interpreta como som.

É fácil compreender a importância que a representação gráfica do estímulo vibratório tem na análise do fenômeno acústico. As primeiras tentativas de registrar o som foram através da utilização de espelhos presos em um objeto vibratório e contra o qual se dirigiam focos de luz. Com o advento do osciloscópio no século XX, a tarefa de registrar o som transformou-se em algo muito mais simples. Através de um microfone, é possível converter o impulso acústico em elétrico e os detalhes de uma vibração complexa podem ser observados diretamente na tela do aparelho.

A grande maioria dos sons produzidos no mundo real é complexa e a tarefa de analisar sons parece impossível. É evidente que, do ponto de vista físico, uma partícula em movimento vibratório complexo não pode estar vibrando em mais de uma frequência de maneira simultânea. Entretanto, a decomposição analítica de sons complexos em seus componentes é um recurso matemático usual - um modelo interpretativo, que possibilita a compreensão do

fenômeno vibratório de maneira muito mais palpável e sintética.

Este enfoque teórico e analítico foi proposto por Jean Baptiste Fourier (1768-1830) em um teorema clássico de grande impacto na física. Estabelece que "qualquer vibração periódica, por mais complicada que seja, pode ser representada como a superposição de vibrações harmônicas puras, cuja frequência fundamental é dada pela frequência de repetição da vibração periódica"[11].

O mais importante é que este modelo teórico corresponde de maneira bastante literal às sensações subjetivas da audição pois o ouvido humano interpreta um som complexo como uma somatória de sons mais simples. Em um som complexo, composto de várias frequências simultâneas, cada uma das componentes é chamada de parcial, podendo ser harmônica ou não. Parciais harmônicas são aquelas cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental mais grave, geralmente predominante, e que dá nome à nota.

A série harmônica, portanto, é definida como uma série de frequências em que, para uma dada fundamental  $f$ , as parciais superiores oscilam nas frequências  $2f$ ,  $3f$ ,  $4f$ ,  $5f$  e assim por diante. Do ponto de vista auditivo, as parciais harmônicas se fundem de maneira homogênea com a fundamental, ao passo que parciais inarmônicas tendem a soar de maneira mais desagregada ou dissonante.

Na verdade, a habilidade de descrever a onda sonora em termos das frequências constituintes tem importância particularmente relevante devido ao fato de que a receita de vibração é um elemento indicativo do timbre e qualidade tonal dos instrumentos musicais. Até certo ponto, a diferença entre um violino, saxofone ou flauta pode ser explicada pelas diferenças no conteúdo harmônico das respectivas ondas sonoras.

Aceito em 18 de Dezembro de 2005.

Por decorrência da perspectiva analítica de Fourier, uma nova técnica de representação gráfica do fenômeno sonoro surgiu; na análise espectral é possível visualizar o estímulo sonoro na forma de um gráfico cujas variáveis são força ou pressão versus frequência. Trata-se de uma análise que ocorre no "domínio da frequência" ao invés de ocorrer no "domínio do tempo" como é o caso do osciloscópio.

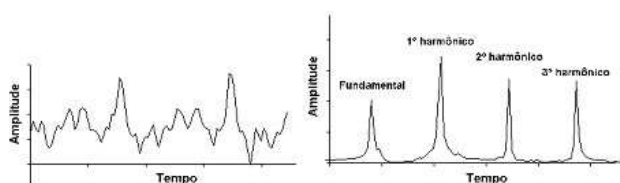


Figura 1: Exemplo de onda sonora complexa e respectiva análise espectral, Fonte: [8]

## 2. Cordas vibrantes e batimentos

Uma corda musical pode ser definida como um fio de material específico (do tipo tripa, seda, náilon, aço ou similar), com diâmetro reduzido em relação ao comprimento e firmemente esticada entre dois pontos fixos. Uma boa corda musical é aquela que possui pouca rigidez e cuja tensão de retesamento contribui com o máximo das forças que a fazem vibrar.

As leis físicas que regem o funcionamento das cordas vibrantes são conhecidas há bastante tempo e denominadas leis de Mersenne em homenagem ao físico e teórico musical francês Marin Mersenne (1588-1648). De acordo com estas leis, existem três fatores determinantes da frequência vibracional de uma corda esticada: comprimento, tensão e densidade linear. O último, densidade linear, é uma função de massa por unidade de comprimento e, na maior parte das vezes, pode ser interpretado como uma medida do diâmetro da corda.

As três variáveis relacionam-se da seguinte maneira:

1. uma corda longa vibra em frequência mais alta que uma curta submetida à mesma tensão, de tal forma que, dobrando-se o comprimento da corda a frequência vibratória cai para metade do valor original;
2. a frequência de uma corda cresce em proporção com a raiz quadrada da tensão, de tal forma que uma mudança para uma oitava acima (dobro da frequência) requer uma aumento de tensão em quatro vezes o valor original;
3. fixada a tensão e o comprimento, a frequência cai em proporção à raiz quadrada da densidade linear da corda, ou seja, se a densidade linear de uma corda aumentar quatro vezes a frequência cairá para metade do valor original.

Na tentativa de conciliar os efeitos destas variáveis na fabricação de pianos, alguns problemas foram encontrados. Por exemplo, se todas as cordas tiverem o mesmo diâmetro e forem submetidas à mesma tensão, terminaremos com cordas de mais de seis metros de comprimento no grave; por outro lado, se tentarmos diminuir o comprimento das cordas graves em concomitância com uma redução da tensão, a qualidade do som é bastante prejudicada. Por fim, se tentarmos compensar estes efeitos mediante o aumento do diâmetro das cordas no baixo, resultaremos com pequenas barras de aço pouco flexíveis e inarmônicas.

A maneira como homens práticos aprenderam a lidar com esses problemas foi sendo elaborada no decorrer dos anos. As soluções adotadas e os compromissos de ordem técnica resultaram em instrumentos modernos teoricamente imperfeitos, ainda que sejam universalmente aceitos e adequados para a realidade musical vigente.

De acordo com Benade [1], as tentativas dos fabricantes em superar as dificuldades resultaram nas seguintes particularidades:

*Até uma oitava abaixo do dó central, as cordas são alongadas através de um fator de 1,94 ao invés de 2 por oitava, os diâmetros são aumentados na proporção de 9,3% por oitava, e a tensão é reduzida ao valor apropriado para trazer a corda à altura correta. Abaixo deste ponto, as cordas são muito pouco alongadas e a frequência é abaixada através da utilização de cordas enroladas com fios de cobre permitindo aumentar a massa sem elevar insuportavelmente a rigidez. O diâmetro, e portanto a rigidez, da última corda não revestida é escolhido de maneira a combinar com a rigidez da primeira revestida com cobre de maneira que se obtém uma escala de som regular. Através desta discussão, percebe-se que os fabricantes de pianos tiveram que voltar atrás em seus ideais a fim de que fosse possível obter um instrumento de tamanho prático, e que arranjaram as coisas de forma tal que a parte média do piano, que é a mais usada, é boa, enquanto que a qualidade do som decai gradualmente na medida em que se desce na escala, na tentativa de evitar que as notas graves, que não são tão boas, se destaquem e sobressaiam.*

Dentre os diversos modos de vibração possíveis nas cordas musicais sobressaem os modos transversais. Estas vibrações são complexas e teoricamente harmônicas, produzindo não só uma nota fundamental como também toda uma série de parciais. Eventualmente, estas parciais podem ser forçadas a predominar mediante um leve toque na sua metade ou outra fração inteira do seu comprimento. Desta maneira, é possível se visualizar os componentes vibratórios puros, devidamente representados na figura 2.

Da mesma forma que em outros sistemas vibratórios, um efeito acústico particularmente relevante ao técnico e afinador de pianos, denominado de batimento, ocorre

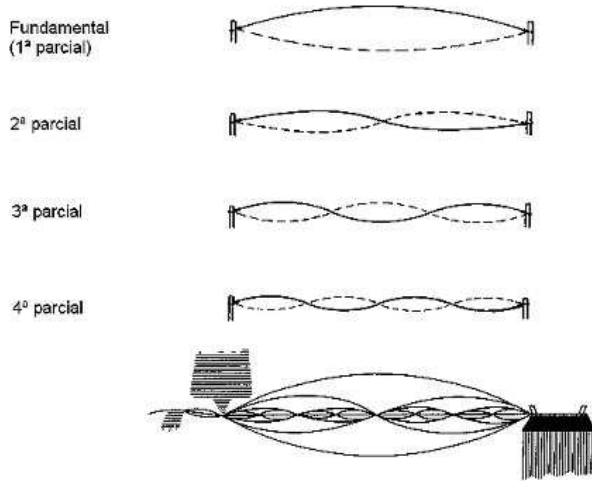


Figura 2: Modos de vibração em cordas musicais, Fonte: [10]

quando duas cordas cujas freqüências sonoras se encontram bastante próximas são estimuladas ao mesmo tempo. Trata-se de uma breve modulação em volume (e timbre) cuja freqüência de oscilação fica menor na medida em que as freqüências se aproximam. Este fenômeno decorre da combinação das freqüências originais na membrana auditiva, resultando num efeito de interferência com a freqüência da diferença entre freqüências originais.

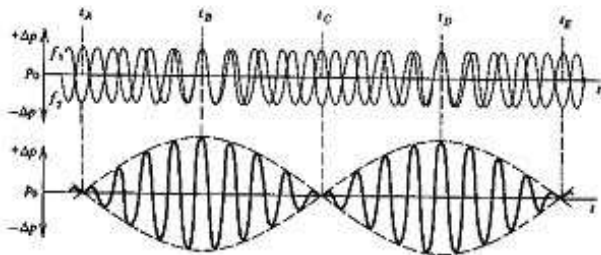


Figura 3: Gráfico de batimentos resultante da interferência entre ondas sonoras próximas, Fonte: [9]

Se uma nota de 440 Hz e outra de 442 Hz soarem juntas, é possível se discernir com clareza um batimento de 2 Hz, desde que se saiba o que ouvir. O interessante é que batimentos também podem ser ouvidos entre os harmônicos de determinadas notas, desde que se encontrem bastante próximos, e este efeito é criteriosamente procurado por afinadores experientes. Por exemplo, em uma escala temperada, é possível se distinguir um batimento de 0.886 Hz entre o terceiro harmônico de C4 (784,878 Hz) e o quarto harmônico de G3 (783,992 Hz)

### 3. Inarmonicidade

Em um sistema físico composto por uma corda ideal, a força restauradora que dá origem ao movimento oscilatório surge a partir da tensão a qual a corda se encontra submetida. Entretanto, cordas reais diferem dos modelos teóricos devido ao fato de não serem perfeitamente flexíveis ou maleáveis. Neste caso, a força restauradora recebe uma contribuição oriunda da rigidez ou tenacidade da corda vibrante que, embora seja bastante pequena frente à totalidade da força em ação, não pode ser desprezada.

A tenacidade existente nas cordas reais provoca pequenos desvios inarmônicos na série harmônica de uma corda idealizada. Trata-se de um efeito que ocorre em todas as freqüências vibracionais de uma determinada nota, mas afeta mais os modos superiores resultando, por consequência, em um alargamento da série harmônica. Reblitz [10] expõe a questão da seguinte forma:

*Quando uma corda tipicamente imperfeita de um piano vibra, a fundamental e todos os parciais são produzidos pelo mesmo pedaço de corda, de espessura uniforme. Quando mais alto for a parcial, menor e mais tenaz será o segmento de corda utilizado. Quanto maior for a tenacidade deste segmento, maior será a freqüência de vibração e mais "sustenido" se encontrará o parcial. O resultado? Quanto mais alto se encontrar a parcial considerada, maior será o desvio, no sentido "sustenido", em relação ao seu harmônico teórico.*

Cordas mais longas apresentam desvios de inarmonicidade menores e é justamente por esta razão que pianos de concerto, de grandes dimensões, possuem uma sonoridade superior à de pianos de armário. Segundo [10]:

*Pianos grandes tem cordas relativamente mais longas e menos inarmonicidade. Pianos pequenos tem cordas curvas e tenazes com bastante inarmonicidade. A inarmonicidade, em conjunto com a intensidade relativa das várias parciais, determina, em grande parte, a qualidade tonal de um piano. Esta é a causa dos graves pobres e pequenos de uma típica espineta, e os graves ricos e potentes de um piano de concerto.*

Inarmonicidade é a causa de diversos problemas técnicos, além de personalizar o instrumento a ser ajustado e impossibilitar a utilização de aparelhos eletrônicos comuns na precisa tarefa realizada por afinadores profissionais.

### 4. A escala temperada

Ao se afinar ou construir um instrumento como o piano é necessário adotar-se uma freqüência de referência (por exemplo, A=440 Hz) e decidir o critério para o espaçamento de cada uma das notas da escala cromática. Esta distribuição de freqüências é chamada de temperamento e

geralmente reflete as particularidades de uma determinada época e dos instrumentos utilizados.

A análise histórica destes processos tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores e possui um caráter particularmente relevante para musicistas interessados em "performances de época". As sutilezas são inúmeras e, ainda que possam parecer irrelevantes para ouvintes comuns, elas freqüentemente assumem um significado bastante substancial para músicos treinados.

De um modo geral, a criação da maioria dos sistemas de afinação ao redor do mundo tem como fundamento a maneira pela qual os intervalos musicais são interpretados pelo ouvido humano. Sob este ponto de vista, eles possuem características próprias associadas à razão aritmética entre as freqüências das notas constituintes. Por exemplo, um intervalo de quinta é percebido quando existe uma relação fracional simples de 3 para 2 entre as freqüências individuais.

Da mesma maneira, todos os intervalos musicais podem ser interpretados em termos de suas freqüências relativas para com a tônica. Neste caso, uma escala maior idealizada poderia apresentar as seguintes relações: 1:1, 9:8, 5:4, 4:3, 3:2, 5:3, 15:8 e 2:1. Um sistema como este, fundamentado em intervalos puros, recebe a designação de sistema de entoação justa.

É importante esclarecer que embora o termo escala justa esteja associado a um tipo específico de afinação freqüentemente utilizado na Renascença, ele refere-se à qualquer escala que atenda ao requisito genérico de intervalos baseados em razões matemáticas simples. Sob este ponto de vista, várias possibilidades existem ainda que o moderno sistema de temperamento igual não seja um deles.

Apesar da lógica inerente dos sistemas de entoação justa, eles passaram a apresentar problemas na medida em que a música ocidental foi se tornando gradualmente mais sofisticada. Hopkin [5] apresenta estas dificuldades da seguinte maneira:

*Em temperamentos justos, os graus da escala ocorrem de maneira inevitavelmente tal, que os espaços entre os eles são irregulares; não existe uma unidade intervalar uniforme. Isto representa um problema? Nunca foi percebido como tal sabe-se lá por quanto séculos. Entretanto após o período da Renascença, surgiu na alta-cultura musical Européia um crescente interesse no enriquecimento harmônico da música através da modulação de tom para tom. Isto é difícil em afinações com espaçamentos assimétricos entre os intervalos porque, para se alcançar os graus desejados da escala em cada nova tonalidade é necessário a presença de notas inexistentes na tonalidade original, e o número de notas necessárias cresce rapidamente a um número não-manejável. Torna-se impraticável construir um instrumento que produz tantas notas.*

Vê-se, portanto, que nos sistemas justos ocorre uma clara inadequação de afinação na medida em que se afasta da tonalidade para a qual o instrumento foi construído ou afinado. A saída encontrada foi a adoção de temperamentos fechados nos quais se assumiu uma solução de compromisso em que, apesar dos desvios introduzidos ao ideal de intervalos puros, todas as tonalidades são suficientemente aceitáveis ainda que não necessariamente iguais.

O ápice deste processo evolutivo ocorreu no século XIX, quando praticamente todos os instrumentos musicais adotaram como referência de afinação o sistema de temperamento igual. Este sistema tem como princípio a eqüidistância das notas da escala cromática tornando possível lidar de maneira homogênea com as complexidades do processo musical moderno. No sistema de temperamento igual os "erros" encontram-se distribuídos de maneira uniforme e não existem tonalidades melhores ou piores.

Na verdade, esta uniformidade na distribuição dos "erros" de afinação foi considerada uma desvantagem no período barroco e passaram-se praticamente dois séculos até que o sistema se encontrasse amplamente disseminado. Hoje em dia, o fato das terças no sistema de temperamento igual serem excessivamente "abertas" não representa um impedimento de fato, visto que os nossos ouvidos se encontram fortemente habituados. Sob este ponto de vista, [13], afirma que "os ouvidos de músicos habilidosos tendem a demandar terças maiores sustentadas em contextos melódicos, e estas considerações melódicas sobrepõem as demandas harmônicas em contextos de solo e de grupos".

## 5. Afinação de pianos e alargamento de oitavas

Ao se afinar a região central do piano, procura-se ajustar as cordas de cada uma das notas de maneira que produzam freqüências de batimentos específicas quando comparadas com outras previamente afinadas e tomadas como referência. A primeira nota da denominada região de temperamento é afinada por intermédio de uma comparação direta com um diapasão, em geral um A 440 Hz ou C 523,25 Hz. A partir daí, o afinador compara e ajusta intervalos específicos procurando pelos batimentos que ocorrem entre os respectivos harmônicos.

Diversos procedimentos seqüenciais são possíveis, formados não só pelas notas a serem afinadas como pelos denominados intervalos de teste. Na medida em que se progride na seqüência programada, novos intervalos, afinados de maneira indireta, se formam e permitem que se confira cada passo do procedimento. Por exemplo, em [10], após de afinar seqüencialmente as notas C5, C4, F3 e F4, já é possível verificar se as notas C4 e F4 apresentam a relação esperada de 1,18 batimentos por segundo.

A tabela 1 - baseada em [10] - indica, para uma escala de temperamento igual, quais são os intervalos passíveis



Tabela 1: Tabela de harmônicos comparados e expectativa de batimentos, Fonte(Parcial): [10]

	F#3 / Gb3 184,997	G3 195,998	G#3 / Ab3 207,652	A3 220,000	A#3 / Bb3 233,082	B3 246,942	C4 261,626	C#4 / Db4 277,183	D4 293,665	D#4 / Eb4 311,127	E4 329,628	F4 349,228
F4 349,228												
E4 329,628												*
D#4 / Eb4 311,127											*	*
D4 293,665									*	*		h6D, h5F 15,850
C#4 / Db4 277,183								*	*		h6C#, h5E 14,958	h5C#, h4F 10,997
C4 261,626							*	*		h6C, h5D# 14,121	h5C, h4E 10,382	h4C, h3F 1,180
B3 246,942						*	*		h6B, h5D 13,327	h5B, h4D# 9,798	h4B, h3E 1,116	*
A#3 / Bb3 233,082					*	*		h6A#, h5C# 12,577	h5A#, h4D 9,250	h4A#, h3D# 1,053	*	h3A#, h2F 0,790
A3 220,000				*	*		h6A, h5C 11,870	h5A, h4C# 8,732	h4A, h3D 0,995	*	h3A, h2E 0,744	*
G#3 / Ab3 207,652			*	*		h6G#, h5B 11,202	h5G#, h4C 8,244	h4G#, h3C# 0,941	*	h3G#, h2D# 0,702	*	h5G#, h3F 9,424
G3 195,998		*	*		h6G, h5Bb 10,578	h5G, h4B 7,778	h4G, h3C 0,886	*	h3G, h2D 0,664	*	h5G, h3E 8,894	*
F#3 / Gb3 184,997	*	*		h6F#, h5A 9,982	h5F#, h4A# 7,343	h4F#, h3B 0,838	*	h3F#, h2C# 0,625	*	h5F#, h3D# 8,396	*	*
F3 174,614	*	*	h6F, h5G# 9,424	h5F, h4A 6,930	h4F, h3A# 0,790	*	h3F, h2C 0,590	*	h5F, h3D 7,925	*		0

de utilização, os harmônicos a serem comparados e qual a frequência de batimentos esperada.

Ao afinar o instrumento adota-se um procedimento seqüencial específico e, sabendo o que ouvir, é possível contar os batimentos em frequências que podem ser ajustadas ao metrônomo; por exemplo, ao invés de contar improváveis 0.59 batimentos por segundo, conta-se aproximadamente 3 batimentos à cada 5 segundos, correspondendo à marca 36 do metrônomo ou 72 à cada 2 tiques.

Evidentemente, neste procedimento de ajuste da região intermediária do piano, utilizam-se cunhas ou tiras de feltro que emudecem duas das três cordas correspondentes à cada nota do piano. Após o ajuste de temperamento, as cunhas ou tiras de feltro são retiradas de maneira gradual e ajusta-se cada uma das cordas que voltam a ressoar em uníssono com aquelas que foram ajustadas inicialmente. Uma vez terminado o procedimento de afinação da região central do piano, prossegue-se ajustando por oitavas as cordas remanescentes das regiões graves e agudas do instrumento.

Ao se medir os resultados obtidos por um afinador experiente descobre-se que, por causa dos efeitos de inarmonicidade previamente discutidos, obtém-se um efeito de distorção bastante característico. A região intermediária do piano irá se mostrar bastante próxima dos modelos teóricos; entretanto, na medida em que se dirige aos agudos, eles se mostrarão cada vez mais "altos" ou "sustenidos" a tal ponto que um C9 agudo pode se encontrar 20 ou 30 "cents" além do esperado. Da mesma maneira, um processo de "bemolização" ocorre na medida em que dirige à região grave do instrumento.

Cada instrumento apresenta a sua própria "curva de distorção", denominada curva de inarmonicidade. Os fatores determinantes da sua forma são diversos, destacando-se o comprimento das cordas em relação à sua espessura e o projeto de escala adotado pelo fabricante.

No gráfico abaixo, visualiza-se uma possibilidade de curva de inarmonicidade lembrando-se que pianos maiores apresentam maior sutileza nos efeitos de "distorção" ou "alargamento" das regiões graves e agudas.

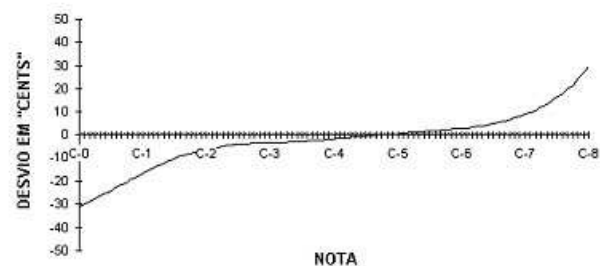


Figura 4: Exemplo de curva de inarmonicidade, Fonte: [12]

É justamente por causa destas características individuais de cada instrumento que o processo de afinação de pianos continua a ser praticamente artesanal. Os resultados são adequados na medida em que se procede de maneira comparativa, uma habilidade exclusiva de seres humanos ao invés da simples medição eletrônica de frequências sonoras. Hoje em dia, a afinação de pianos através da utilização de artefatos eletrônicos dedicados é possível; neste

caso, adota-se sempre um cálculo inicial de inarmonicidade a fim de validar as medidas feitas para cada instrumento em particular.

Curiosamente, é justamente a "imperfeição" de pianos um dos aspectos que os transformaram num dos mais difundidos e aceitos instrumentos da cultura ocidental. A inarmonicidade das cordas do piano é considerada uma qualidade desejada, comumente associada com "calor". Tentativas de produzir sons de piano a partir de uma síntese composta por parciais inteiramente harmônicas tem como resultado a criação de sons "frios" e inadequados do ponto de vista musical. Sob este ponto de vista, o piano tem na sua "imperfeição" um caráter distintivo que o aproxima da natureza humana e valoriza o seu poder de comunicação e expressão artística.

#### Referências

- [1] Benade, A.: *Horns, Strings and Harmony*, Mineola, N.Y.: Dover Publications, 1992 (originalmente publicado pela Anchor Books, 1960).
- [2] Berg, R.E.; Stork, D.G.: *The Physics of Sound*, Englewood Cliffs: N.J.: Prentice-Hall, 1995.
- [3] Campbell, J.: *The Equal Tempered Scale and Some Peculiarities of Piano Tuning*, 1997. disponível na Internet: <http://www.precisionstrobe.com/apps/pianotemp/temper.html>
- [4] Coutney, D.: *Introduction to Spectrum Analysis*, Experimental Musical Instruments, September 1992, disponível na Internet: <http://chandrakantha.com/articles/spectrum/spectrum.html>
- [5] Hopkin, B.: *Musical Instrument Design: Practical Information for Instrument Design*, Tucson, Sharp Press, 1996
- [6] Goldemberg, R.: *Princípios de Acústica Musical aplicados à Clarinetas e Instrumentos de Sopro*, Acústica & Vibrações, n. 30, pp. 8-24, dezembro 2002
- [7] Hall, D.: *Musical Acoustics*, Pacific Grove, Brooks/Cole Publishing Co., 1990
- [8] Keddle, R.: *Introduction to Spectrum Analysis*, Bell College, Hamilton, UK, 2004, disponível na Internet: <http://eserver.bell.ac.uk/staff/keddler/SpectrumAnalysis/intro.htm>.
- [9] Rigden, J.S.: *Physics and the Sound of Music*, New York, John Wiley & Sons, 1984
- [10] Reblitz, A.A.: *Piano Servicing, Tuning & Rebuilding*, Vestal, The Vestal Press, 1976
- [11] Roederer, J.G.: *Introduction to the Physics and Psychophysics of Music*, New York, Springer-Verlag, 1975
- [12] Skubic, M.: *Instruction Manual for Peterson AutoStrobe 490-ST Strobe Tuner*, Alsip, 2002, disponível na Internet: [www.peterson-tuners.com/support/pdfmanuals/](http://www.peterson-tuners.com/support/pdfmanuals/)
- [13] Stauffer, D.D.: *Intonation Deficiencies of Wind Instruments*, Birmingham, Royal Printing Service, 1999, (tese de doutorado originalmente publicada pela Catholic University of America, 1954)

# Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva

Masiero, B.S.\*; Iazetta, F.†

\*Departamento de Engenharia de Telecomunicações, POLI/USP, bruno.masiero@poli.usp.br

† Departamento de Música, ECA/USP, iazetta@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.

PACS no.

## 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 uma sala em no mínimo 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 impecilho, 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.

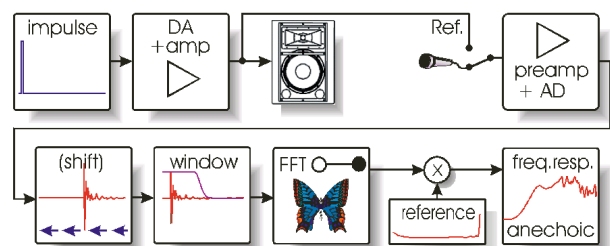


Figura 1: Esquema do método de medição por impulso, Fonte: [5]

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

Aceito em 19 de Dezembro de 2005.

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 ideia 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 MÜLLER & 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.

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

$$\cos x[h(f) \cos y] + \sin x[h(f) \sin y] = h(f) \cos(x-y) \quad (1)$$

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.

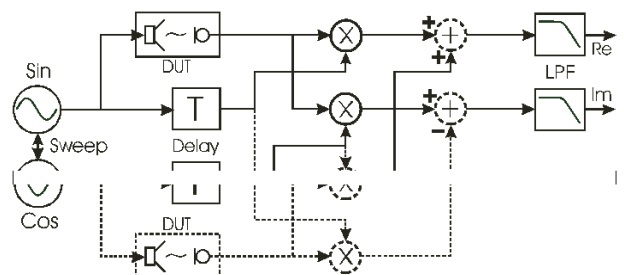


Figura 2: Esquema de medição do método TDS

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 ideia 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].

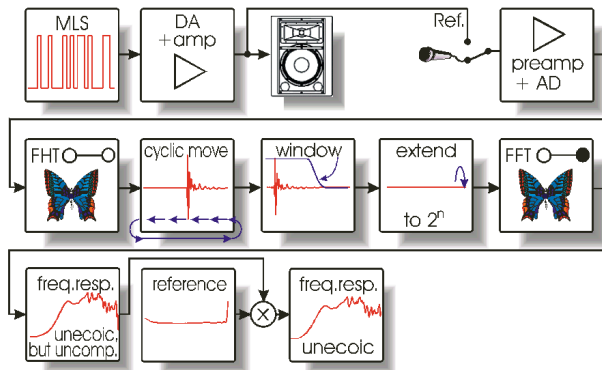


Figura 3: Esquema do método MLS, Fonte: [5]

### 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.

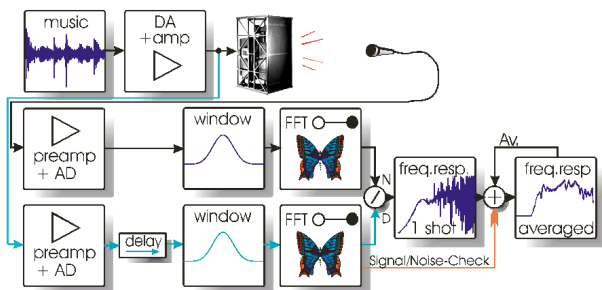


Figura 4: Obtenção da resposta em frequência com excitação qualquer, Fonte: [5]

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 como indicada na Figura 5.

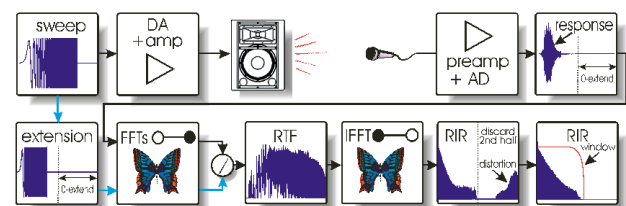


Figura 5: Deconvolução linear para a obtenção da resposta impulsiva por meio de varredura logarítmica, Fonte: [5]

### 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 senóide 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 teoricamente 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 Lundeby 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 Schroeder, substituindo a IR elevada ao quadrado pelo produto de duas IR medidas separadamente na mesma posição.

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

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, e muito menor que este, 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 passos de 5 a 8 até o ponto de cruzamento convergir ou atingir-se o número máximo de iterações.

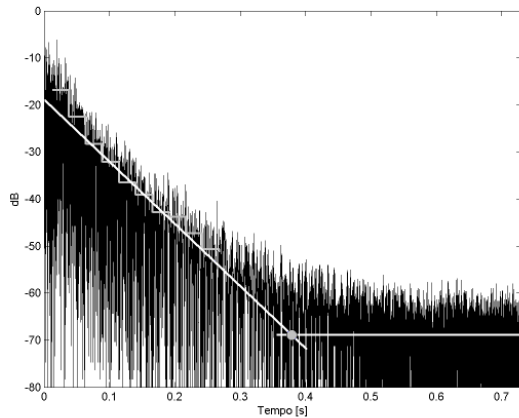


Figura 6: O método de Lundeby

#### 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  $FC=0$  dB. Mas, o fator de crista das MLS's usadas na prática é sensivelmente

maior que 0 dB. 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 8 dB e 5 dB menor que o nível máximo do conversor. A figura 7 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  $FC=8.5$  dB, valor consideravelmente maior que os teóricos 0dB da MLS.

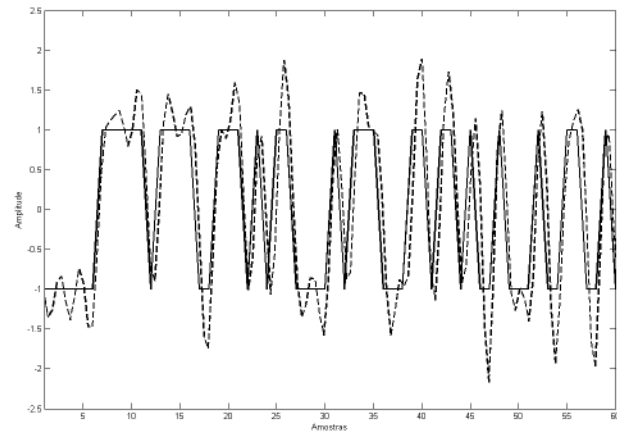


Figura 7: Sinal MLS original (contínua) e o mesmo sinal após passar por um filtro *anti-aliasing* (não contínua)

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  $FC = 3.6$  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 (item 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 (parágrafo 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 (parágrafo 1.1.5) 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 8. 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.

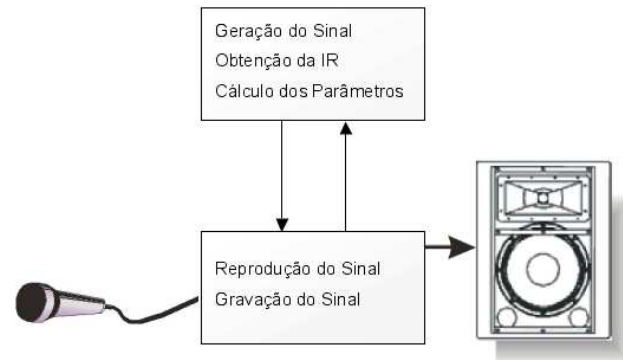


Figura 8: Diagrama de blocos de um sistema de medição acústica

### 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 geradas 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 Processamento da IR para análise acústica de salas, parágrafo 1.1.3 (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.

### 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.

## 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 - EPUSP) 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.

## Referências

- [1] Vorländer M., Bietz H.: *Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time*, **Acustica**, Vol. **80**, pp. 205-215, 1994
- [2] *ISO 3382: Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997
- [3] Burt, Phillip M.S.: *Measuring Acoustic Responses with Maximum-Length Sequences*, **ITS Proceedings**, pp 284-289, 1998
- [4] Heyser R.C.: *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(6)**, 2001, pp.443
- [6] Vanderkooy, John: *Another Approach to Time Delay Spectrometry*, **J.AES**, Vol. **34**, 1986, pp.523-538
- [7] Greiner, R.; Wania, J.; Noejovich, G.: *A Digital Approach to Time Delay Spectrometry*, **J.AES**, Vol.**37**, 1989, pp. 593-602
- [8] Chu W.T.: *Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method*, **J. Acoust. Soc. Am.**, **63(5)**, 1978, pp. 1444-1450
- [9] Hirata Y.: *A Method of Eliminating Noise in Power Responses* **J. Sound Vib.**, Vol. **82**, 1982, pp. 593-595
- [10] Lundeby A., Vigran T.E., Bietz H., Vorländer M. *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, pp. 135-137

## Congressos

### **EURONOISE 2006 The 6th European Conference on Noise Control**

30 May -1 June 2006, Tampere, Finland  
[www.euronoise2006.org/](http://www.euronoise2006.org/)

### **151th Meeting of the Acoustical Society of America**

5-9 June 2006, Providence, Rhode Island, USA  
<http://asa.aip.org/meetings.html>

### **13th International Congress of Sound and Vibration**

July 2-6, 2006, Vienna, Austria  
[www.euronoise2006.org/](http://www.euronoise2006.org/)

### **INTERSPEECH 2006 - International Conference on Spoken Language Processing**

17 - 21 September, 2006, Pittsburgh, EUA  
[www.interspeech2006.org](http://www.interspeech2006.org)

### **ISMA conference on Noise and Vibration Engineering**

September 18-20, 2006, Leuven (Belgium)  
[www.isma-isaac.be/](http://www.isma-isaac.be/)

### **tecniaústica - 37º Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica y EAA Simposium Europeo de Hidroacústica**

18-20 Octubre 2006, Gandia, Valencia, España  
[www.ia.csic.es/Sea/tecniaustica\\_06.htm](http://www.ia.csic.es/Sea/tecniaustica_06.htm)

### **4th Joint Meeting of the Acoustical Society of America and the Acoustical Society of Japan**

28 November-2 December, 2006, Honolulu, Hawaii, USA  
<http://asa.aip.org/meetings.html>

### **35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006)**

3-6 December, 2006, Hawaii, USA  
[www.internoise2006.org/](http://www.internoise2006.org/)

### **19 th International congress on Acoustics**

2-7 September, 2007, Madrid, Spain  
[www.ica2007madrid.org/](http://www.ica2007madrid.org/)

### **V Congreso Iberoamericano de Acústica**

25-28 Octubre 2006, Santiago de Chile, Chile

En Octubre de 2006, la hermosa ciudad de Santiago, Chile tendrá el privilegio de ser la sede de la quinta versión, del "Congreso Iberoamericano de Acústica", que se realizará en conjunto con el Encuentro Chileno de Acústica 2006, INGEACUS 2006, y SEMACUS 2006, una serie de eventos paralelos que representan un espacio abierto tanto para los especialistas en la materia como para todo al área académica, estatal, privada y empresarial que se relaciona con el tema acústico.

En estos encuentros, se presentarán los más recientes trabajos de los diferentes profesionales del campo de la acústica tanto a nivel nacional como internacional, donde importantes temas relacionados han cobrado excepcional presencia a nivel tecnológico, académico, de organismos estatales, a nivel privado y empresarial. La presentación de los trabajos será a través de ponencias de destacados conferencistas del área, trabajos de tesis de alumnos de las carreras afines, y de trabajos de investigación y desarrollo tanto de universidades como particulares que ha sobresalido a nivel nacional e internacional. Este importante evento para Chile y sus países vecinos, estará acompañado de una Feria donde empresas e instituciones mostraran sus productos y servicios relacionados con la acústica.

#### Programa general

Conferencias invitadas, sesiones técnicas, posters, mesas redondas, demostraciones técnicas de productos y servicios.

#### Temas generales

- Acústica ambiental
- Acústica de edificios
- Efectos del ruido
- Ruido de Maquinaria
- Instrumentación y metrología
- Psicoacústica
- Acústica arquitectónica
- Vibro-acústica
- Aislamiento de vibraciones y amortiguamiento

#### Inscripciones y comunicaciones

Los interesados en presentar trabajos en sesiones técnicas y posters deberán inscribirse al igual que los participantes al evento. Las inscripciones podrán realizarse a través de un formulario disponible en el sitio web del congreso: [www.fia2006.cl](http://www.fia2006.cl).

Para presentar un trabajo deberá primero enviar el título del mismo y un resumen de 200 palabras, antes del 31

de marzo del año 2006, indicando los autores y el organismo o empresa que representa cada uno de los autores. El texto final deberá ser enviado a mas tardar el 30 de junio del 2006. Cada inscripción da derecho a un máximo de 2 comunicaciones.

#### Fechas importantes

Envío de resúmenes: 31/marzo/2006

Envío de comunicaciones: 30/junio/2006

#### Comité Organizador FIA

- Antonio Perez Lopez, España (SEA), Presidente FIA
- Samir N. Y. Gerges, Brasil (SOBRAC), Vice Presidente FIA
- Antonio Calvo Manzano, España (SEA), Secretario general FIA
- Antonio M. Mendez , Argentina (AdAA)
- Christopher Rooke , Chile (SOCHA)
- Sergio Beristain, Mexico (IMA)
- Carlos Jimenez Dianderas, Perú (SPEA)
- José Patricio, Portugal (SPOA)

#### Comité Organizador

- Christopher Rooke, (SOCHA), Presidente
- Enrique Suárez (UACH)
- Jaime Delanoy (UPR)
- Ricardo Pese (USACH)
- Mauricio Vergara (SOCHA)

#### Comité Científico

- Jorge P. Arenas (UACH), Presidente
- Sergio Floody (UPR)
- Victor Poblete (UACH)
- Eugenio Collados (USACH)

#### Tarifas de inscripción

	Antes del 31/10/2005	Después del 31/10/2005
MIEMBROS SOCHA/FIA	US\$ 90	US\$ 120
NO- MIEMBROS	US\$120	US\$ 150
ESTUDIANTES	US\$ 50	US\$ 65
ACOMPañANTES	US\$ 50	US\$ 65

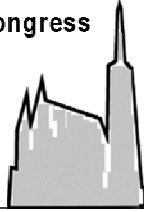
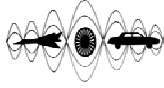
Información, inscripción, resúmenes y comunicaciones

[www.fia2006.cl](http://www.fia2006.cl)

# ICSV13 - Vienna

## The Thirteenth International Congress on Sound and Vibration

Vienna, Austria, July 2-6, 2006



### Organised by

Vienna University of Technology,  
Institute for Mechanics of Materials and Structures  
Austrian Academy of Sciences, Acoustics Research Institute  
Austrian Federal Ministry of Education, Science, and Culture

### Under the Auspices of

The International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV)  
affiliated to IUTAM

### In Cooperation with

The Austrian Acoustics Association  
Austrian National Committee for Theoretical and Applied Mechanics  
The American Society of Mechanical Engineers  
(ASME International)

### International Organising Committee

Malcolm J. CROCKER, USA (Scientific Chair)  
Samir GERGES, Brazil      Finn JACOBSEN, Denmark  
Barry M. GIBBS, UK      Thomas LAGÖ, USA  
Colin H. HANSEN, Australia      David E. NEWLAND, UK  
Nikolay I. IVANOV, Russia      Jan. W. VERHEIJ, The Netherlands

### Local Organising Committee

Josef EBERHARDSTEINER (Chair)  
Herbert MANG (Chair)  
Holger WAUBKE (General Secretary)  
Martina PÖLL (Congress Secretary)  
Ewald BENES      Alfred KLUWICK  
Werner DEUTSCH      Franz G. RAMMERSTORFER  
Jürgen DREYER      Johann WASSERMANN  
Rudolf HEUER      Gregor WIDHOLM

### Welcome

We are pleased to inform you of the 13<sup>th</sup> International Congress on Sound and Vibration (ICSV13) to be held from July 2 to 6, 2006, in Vienna, Austria. ICSV13 participants will take part in a Congress with a first-rate scientific programme and attractive exhibitions.

Along with the IIAV officers and directors, the organisers express their hope that you will attend ICSV13 and present a paper. We look forward to welcoming you in Vienna in July, 2006.

### Congress Venue

The venue of ICSV13 is Vienna University of Technology (TU Vienna), which is located in the centre of the city. Vienna's most impressive sights are within walking distance of TU Vienna or can be easily reached by public means of transport.

In 2006, the 250<sup>th</sup> anniversary of Wolfgang Amadeus Mozart's birth will be celebrated with numerous exhibitions and concerts throughout the whole year.

### Scientific Programme

Technical and experimental research papers in the fields of acoustics, noise and vibration, and other related subject areas are welcome. They include but are not restricted to:

- Acoustics and Vibration Theory
- Computational Acoustics
- Aeroacoustics and Aviation Noise
- Architectural Acoustics
- Community Noise
- Occupational Noise
- Active Noise & Vibration Control
- Condition Monitoring & Vibration Testing
- Machinery Noise and Vibration Control
- Duct Acoustics
- Sound Quality and NVH
- Human Response to Sound and Vibration
- Vibration and Shock
- Low -Frequency Noise and Vibration
- Measurement Techniques
- Modal Analysis
- Noise Control Elements
- Nonlinear Acoustics and Vibration
- Outdoor Sound Propagation
- Signal Processing
- Sound intensity
- Sound Sources
- Underwater Acoustics

### Submission of Abstracts

Prospective authors are kindly requested to submit an abstract (300 words maximum) related to the topics of the Congress or to a Structured Session through the Congress website. Instructions for preparing full-length papers will be provided with the notification of acceptance of the abstract.

### Exhibition and Sponsoring

Companies are invited to take part in the ICSV13 exhibition. Several attractive possibilities for sponsorship are also being offered.

For further information, please contact the IIAV Exhibition Manager Thomas LAGÖ and/or the ICSV13 Exhibition Management "Media Plan". Contact details are available at the Congress website.

### Social Programme

The social programme has been prepared for the enjoyment of both the participants of ICSV13 and accompanying persons and includes a welcome cocktail on Sunday, July 2, a reception on Monday, July 3, and a banquet on Tuesday, July 4, 2006.

In addition, an attractive accompanying person's programme is being organised.

### Registration and Accommodation

Registration and hotel accommodation is being handled by the Congress Management "Mondial Congress". Online registration forms and contact details are available on the Congress website.

Early registration fees are applicable until **March 31, 2006**.

		Early	Late
IIAV-Members	EUR	490	540
Non-Members	EUR	545	595
Students	EUR	290	340

The fee covers the book of abstracts, proceedings on CD-ROM, coffee breaks, lunches, welcome reception, and the banquet.

		Early	Late
Accompanying Persons	EUR	120	150

The fee includes welcome reception, the banquet, and a city tour.

### Key Dates

Submission of Abstracts (300 words):      **extended to January 15, 2006**  
Notification of Acceptance:      February 28, 2006  
Submission of Full-length Paper (8 pages):      March 31, 2006  
Early Registration:      March 31, 2006



**inter.noise 2006**  
*Engineering a Quieter World*



*Call for Papers*

-  Honolulu, Hawaii, USA
-  Sheraton Waikiki
-  3–6 December 2006

<http://www.internoise2006.org>  
Jointly organized by INCE-USA and  
INCE-Japan

Sponsored by I-INCE

## Welcome Message



Dear Colleagues,

The Organizing Committee of the 35th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2006) extends a warm welcome and invitation to participate fully in what promises to be the premier noise control engineering conference of 2006. The INTER-NOISE 2006 Congress, sponsored by the International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE) and co-organized by the Institute of Noise Control Engineering-Japan and the Institute of Noise Control Engineering-USA, will be held at the Sheraton Waikiki Hotel, Honolulu, Hawaii, USA, from 3–6 December 2006, immediately following the joint ASA/ASJ meeting in the same venue.

In addition to being an interesting and pleasant venue for the congress, Honolulu is truly a crossroads of the Pacific. The Congress will feature a broad range of high-level research papers from around the world, as well as an extensive exhibition of noise and vibration control and measurement equipment and systems. Distinguished speakers will provide additional stimulation for our technical sessions and discussions with a focus on our theme of “Engineering a Quieter World.”

We sincerely welcome you to INTER-NOISE 2006, invite you to participate fully in all aspects of the Congress, and eagerly anticipate what will undoubtedly be a technically successful and personally enjoyable Congress in one of the most beautiful locations in the world.

Sincerely,

David Holger, Co-President

Sonoko Kuwano, Co-President

INTER-NOISE 2006 Congress and Exhibition Organizing Committee

## Organizing Committee

### Co-Presidents

David K. Holger  
Sonoko Kuwana

### Co-Technical Program Chairs

Scott Sommerfeldt  
Ichiro Yamada

### Manager of Exposition

Rich Peppin

### Exposition and Publicity (Asia Pacific Rim)

Hiroaki Takinami

### Congress Coordinator

Pam Reinig

### Accompanying Persons Program

Willa Holger  
Lisa Sommerfeldt

### Coordinator of Related Events

Mark Reinig

### Proceedings Editors

George Maling  
Scott Sommerfeldt  
Ichiro Yamada

### Secretariat

INCE Business Office at  
Iowa State University

### INCE/USA Liaison

Joe Cuschieri



## Plenary Speakers

### Railway Noise

Tatsuo Maeda

### Noise Policy

Tjeert ten Wolde

### Sound Propagation

Gilles Daigle

## International Advisory Committee

<i>Australia</i>	Marion Burgess
<i>Belgium</i>	Gerrit Vermeir
<i>Brazil</i>	Samir Gerges
<i>Canada</i>	Gilles Daigle
<i>China</i>	Jing Tian
<i>Czech Republic</i>	Josef Novák
<i>Denmark</i>	Jens H. Rindel
<i>France</i>	Michel Vallet
<i>Germany</i>	Hugo Fastl
<i>Hong Kong</i>	Kai Ming Li
<i>Hungary</i>	Andras Illenyi
<i>Italy</i>	Giovanni Brambilla
<i>Japan</i>	Michihito Terao
<i>Japan</i>	Hideki Tachibana
<i>Japan</i>	Kohei Yamamoto
<i>Japan</i>	Yoiti Suzuki
<i>Korea</i>	Hee Joon Eun
<i>Norway</i>	Truls Gjestland
<i>Poland</i>	Rufin Makarewicz
<i>Spain</i>	J. Salvador Santiago
<i>Sweden</i>	Tor Kihlman
<i>Switzerland</i>	Beat Hohmann
<i>The Netherlands</i>	Tjeert ten Wolde
<i>UK</i>	Philip A. Nelson
<i>UK</i>	Bernard Berry
<i>USA</i>	Gerald C. Lauchle
<i>USA</i>	Robert Bernhard
<i>USA</i>	Rajendra Singh





## Technical Program

Technical papers in all areas related to noise and vibration control are invited for inclusion in the technical program. The broad theme of the Congress is "Engineering a Quieter World," and papers of specific relevance to this theme are especially encouraged.

In addition to the thematic tracks identified at right, papers are welcome in broad technical areas of noise and vibration control including noise generation and sources, measurement and identification techniques, sound radiation and propagation, modeling and simulation, noise and vibration control devices, aeroacoustics, noise and vibration policies and standards, building acoustics, community and environmental noise, active and passive noise and vibration control, human perception and response to noise and vibration, signal processing, and materials for noise and vibration control.

The Congress will consist of more than 10 parallel sessions as well as a poster presentation area. A number of thematic session tracks and special technical sessions are being organized, and proposals for the organization of additional special sessions are welcome. Prospective organizers of additional sessions should contact Scott Sommerfeldt ([scott\\_sommerfeldt@byu.edu](mailto:scott_sommerfeldt@byu.edu)) or Ichiro Yamada ([i-yamada@center.aeif.or.jp](mailto:i-yamada@center.aeif.or.jp)).

## Special Multi-session Technical Tracks

- Sound Quality
- Noise Policy
- Sound Propagation
- Aircraft and Airport Noise Control
- Highway, Automobile, and Heavy Vehicle Noise
- Railway Noise
- Machinery Noise
- Fan Noise and Aeroacoustics
- Active Noise and Vibration Control
- Vibroacoustics and Vibration
- Building Acoustics
- Barriers
- Noise Control Materials
- Environmental Noise and Soundscapes
- Numerical Simulation, Prediction, and Modeling
- Measurements and Instrumentation
- Community Noise
- Effects of Sound on Humans
- Effects of Vibration on Humans
- Low Frequency Noise and Infrasound





## Paper Submissions

### **Abstracts Due**

15 May 2006

### **Notification of Acceptance**

30 June 2006

### **Papers Due**

18 August 2006

## Call for Papers

### *Instructions for Abstracts*

Abstracts for INTER-NOISE 2006 must be submitted as an e-mail attachment. Attachments must be Word documents with no special characters or equations. Do not submit your abstract as a PDF file.

Please use the following format and send your abstract to: [internoise2006@inceusa.org](mailto:internoise2006@inceusa.org). The subject of the e-mail should be IN06 abstract submission.

- I. Paper title. Capitalize only the initial letter and special letters such as: Korean, NAH, Rayleigh, Worldcup, etc. (20 words maximum).
- II. I-INCE subject classification (classify your paper using the detailed classification of subjects at <http://www.i-ince.org> or <http://www.internoise2006.org>).
- III. First author's name, organization, title, postal address (including country), phone, fax, and e-mail (essential) for correspondence.
- IV. Additional authors' names and addresses (if any).
- V. Indicate specific type of paper.
  - Invited paper (include the session title and organizer)
  - Paper intended for oral presentation
  - Paper intended for poster presentation
- VI. Text of the abstract. The text of the abstract must not exceed 200 words. The text should be typed double-spaced and should include:
  - A brief description of the problem being addressed
  - Why the problem is important
  - Description of the original contribution of the work
  - Pertinent conclusions
- VII. Number or code of the special session, if applicable. Please refer to the Web site of INTER-NOISE 2006 for the information on the topics of special sessions, session code, and its organizers.
  - Sample abstracts will be posted on the Web site.
  - Receipt of your abstract will be acknowledged within two weeks, along with an abstract identification number.
  - Your abstract will be published with only minor copy editing in a booklet to be available at the conference.
  - Final manuscripts must be submitted by 18 August 2006. When abstracts are accepted, authors will receive additional instructions on formatting and transmitting papers.

All registrants for INTER-NOISE 2006 will receive a printed booklet containing all abstracts, the final technical program, and a CD that will include all INTER-NOISE 2006 papers. Conference organizers reserve the right to schedule papers for appropriate sessions and appropriate format (poster versus oral presentation).

## Sightseeing

The lure of adventure and exploration is strong, and nowhere in the world does it find greater expression than in Oahu. Following are just a few of many places to visit before or after the conference.

Diamond Head is Oahu's largest cone, formed over 100,000 years ago by an active bubbling volcano. Nineteenth-century British sailors nicknamed the crater Diamond Head when they mistook the calcite crystals for diamonds. A well-graded trail leads you up the 245-meter summit to a World War II bunker with a bird's-eye view of Honolulu.

One of Oahu's natural wonders, Hanauma Bay is a world-class nature preserve and home to a huge assortment of sea life from colorful rainbow parrotfish, convict tangs, and trumpetfish to mullet, squid, and living coral reefs. The area includes a new Marine Life Education Center with interactive exhibits, displays, and video presentations.

Test your wind stamina at Nuuanu Pali, where periodic wind gusts make it difficult for visitors to walk to the lookout point. Perched 1,000 meters above Windward Oahu, Nuuanu Pali is the site of the famous Battle of Nuuanu led by Kamehameha I in 1795 when he drove hundreds of warriors over the cliff.

The Polynesian Cultural Center, located on Oahu's north shore, brings together the history and cultures of Hawaii, Fiji, New Zealand, Marquesas, Samoa, Tahiti, and Tonga in authentic recreated villages covering over 42 acres. Learn firsthand how Pacific islanders build houses with no nails, expertly spear fish, climb 15-meter trees for coconuts, pound bark into cloth, carve fishhooks, weave mats, and cook with "hot rocks" in an imu (underground oven).

Pearl Harbor is Hawaii's largest harbor and USA's only naval base designated as a National Historic Landmark with three significant memorials: the USS Arizona Memorial; the Battleship Missouri Memorial, a living museum of the most celebrated and last-built battleship; and the USS Bowfin Museum, featuring a World War II submarine and extensive submarine history.



## Conference Information

### Registration

On-line registration and downloadable registration forms will be available 1 January 2006. The completed registration form can be mailed, faxed, or e-mailed to the Conference Secretariat.

### Exposition

A large Expo with displays of materials, instruments, and services in noise and vibration control engineering will be held at the conference venue during the conference. The Expo will open Monday with a special reception for conference and Expo participants. Organizations and companies wishing to participate as exhibitors should contact Richard Peppin, Expo Manager, Scantek, Inc., 7060 Oakland Mills Road #L, Columbia, MD 21046 or PeppinR@ScantekInc.com.

### Social Programs

The social programs will provide opportunities for participants to meet with their colleagues in an informal setting. Reservations for social programs should be paid in advance at the time of registration, if necessary. Not all social events require advance registration.

### Language

The official language of the conference is English.

### Official Invitation

On request, the Organizing Committee will be happy to send a personal invitation for participation in the Conference. It must be understood that such an invitation is only to help visitors obtain funds for travel and accommodation or a visa and is not a commitment on the part of the organizers to provide any financial support. Please contact the Conference Secretariat for these letters.

### Conference Secretariat

INCE/USA Business Office  
210 Marston Hall  
Iowa State University  
Ames, Iowa, USA 50011-2153  
515 294-6142 • [ibo@inceusa.org](mailto:ibo@inceusa.org)

## Conference Venue

The conference venue is the 31-story Sheraton Waikiki. The hotel has well-equipped meeting space and nearly 1,700 guest rooms, most of which will be refurbished before the conference. Rooms and suites have views of white-crested waves, the Ko'olau Mountains with their majestic silhouettes, or Honolulu's skyline. Over two-thirds directly face the Pacific Ocean. Each of the guest rooms includes the following amenities:

- Iron and Ironing Board
- In-room Safe (fee may apply)
- Hair Dryer
- Color Television
- In-room Movie Selection
- Shampoo and Conditioner
- Air Conditioning

Most rooms also include a mini-refrigerator.

The hotel is easily accessible from Honolulu International Airport. There are two options for traveling from the airport to the hotel.

### ***Ilima Waikiki Tours and Transportation:***

This service uses mid-to-large-size vans of up to 20–25 passengers. It makes stops at all four Sheraton Hotels in Waikiki but may include other stops as well. Estimated travel time from airport is 35–55 minutes depending upon traffic conditions, passenger count, and stops. Cost is \$10 per person and arrangements can be made in advance.

***Taxi:*** There are taxi dispatch personnel meeting all arriving flights. Taxis range in size from sedans to vans. Estimated travel time from the airport is 25–45 minutes. Cost is \$25.00, but additional fees may apply for extra passengers, luggage, and waiting time.

***More information on the venue will be posted on the conference Web site beginning 1 January 2006. The Web site will include a link for hotel reservations.***

## General Information

### ***Visa***

Requirements for entry into the state of Hawaii from foreign destinations vary according to country. Please check with the nearest U.S. embassy or consulate for passport and visa information.

### ***Climate***

INTER-NOISE 2006 is scheduled during Hawaii's "winter" season. Participants can expect average daytime temperatures of 26°C (78°F) and ocean temperatures of 24°C (74°F).

### ***Time Difference***

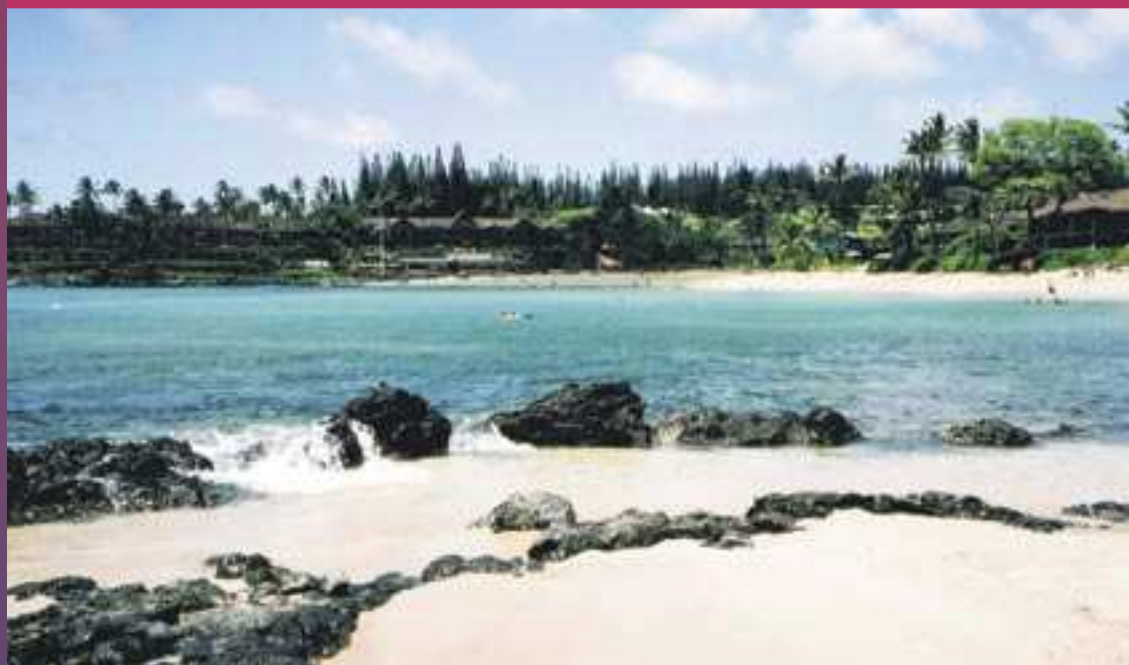
Relative to Greenwich Mean Time, Hawaii is -10 hours.

### ***Currency and Credit Cards***

The unit of currency in Hawaii is U.S. dollars. Foreign currency and travelers' checks can be converted at banks. Exchange counters are located throughout the airport and at many major hotels. Internationally recognized credit cards are accepted at most hotels, shops, and restaurants.

### ***Electricity***

Most hotel outlets will be 110 volts. Always check the power supply before using electrical equipment.



## Social Programs

***Sunday, December 3*** ➤ ***Opening Ceremony and Welcome Reception***

***Monday, December 4*** ➤ ***Exposition Opening Reception***

***Tuesday, December 5*** ➤ ***Congress Banquet (tickets required)***

***Wednesday, December 6*** ➤ ***Closing Ceremony and Reception***

## Accompanying Persons Programs

***Monday, December 4*** ➤ ***Honolulu and Vicinity Sightseeing Tour***

***Tuesday, December 5*** ➤ ***Polynesian Cultural Center***

***Wednesday, December 6*** ➤ ***Oahu Half-day Sightseeing***

## Sócios da SOBRAC em 2005

### Efetivos regulares

Airton Nabarrete  
Alberto Paim da Costa  
Alexandre Klausing Castro  
Ana Claudia Fiorini  
Antonio Borges  
Arcanjo Lenzi  
Carlos Alberto Ghedini Volcov  
Carlos Moacir Grandi  
Claudio Fernandes de Castro  
Clement Zular  
Daniel Mancini Fazio  
Davi Akkerman  
Denise Torreao Correa da Silva  
Dinara Xavier Da Paixão  
Duilio Terzi  
Eduardo Giampaoli  
Elvira B. Viveiros da Silva  
Erasmus Felipe Vergara Miranda  
Evelyn Joice Albizu  
Fernando A.N. Castro Pinto  
Fernando Henrique Aidar  
Fernando Jorge De Souza Antoun  
Fernando Luiz Freitas Filho  
Flavio Maya Simões  
Flogêncio Ribeiro Novais  
Gabriel Rios Cruzat  
George Andre Montenegro Grieser  
Geraldo Tarciso Dias Cavalcanti  
Gilberto Fuchs de Jesus  
Gilmar Luiz Pacheco Roth  
Honorio Cavicchioli Lucatto  
Ieda Chaves Pacheco Russo  
Irene Ferreira de Souza Duarte Saad  
Ivan Bressane Nielsen  
Jair Felicio  
João Afonso Abel Jankovitz  
Joao Gualberto de A. Baring  
Jorge Soares de Almeida  
José Ademir Maturano  
José Geraldo Querido  
José Moacir Nascimento Pinto  
Jose Odilon Homem de Mello  
José Ovídio Peres Ramos  
José Possebon  
José Roberto Arruda  
Juliana Vervloet do Amaral  
Justiniano José Cordeiro de Almeida  
Lilian Seligman Graccioli  
Livio Silva Cavaca

Luciane Cleonice Durante  
Luis Tadeu Lopes de Freitas  
Luiz Antonio Perrone Ferreira De Brito  
Luiz Augusto Muhle  
Luiz Carlos Chichierchio  
Luiz Gomes de Mello  
Marco A. Nabuco de Araujo  
Marco Antonio de Mendonça Vecci  
Marcos Fernando Piai  
Maria de Fatima Ferreira Neto  
Maria de Lourdes Moure  
Maria Lucia Gondim da Rosa Oiticica  
Maria Luiza R. Belderrain  
Mario Cardoso Pimentel  
Mauricy Cesar Rodrigues de Souza  
Milton Vilhena Granado Jr  
Moyses Zindeluk  
Neyla Arroyo Lara  
Nicolai Filimonoff  
Paulo Henrique Trombetta Zannin  
Paulo Massarani  
Pérides Silva  
Peter Joseph Barry  
Ricardo Eduardo Musafir  
Roberto Jordan  
Ricardo Murilo Dias  
Ricardo Ribeiro Pereira  
Roberto Aizik Tenenbaum  
Roberto F.A. Capelletti  
Rogerio da Veiga Cordeiro  
Rudolf M. Nielsen  
Ruysdael Zocoli  
Sadi Poletto  
Samir Nagi Yousri Gerges  
Schaia Akkerman  
Sergio Luiz Garavelli  
Stelamaris Rolla Bertoli  
Sylvio Reynaldo Bistafa  
Vitor Cunha de Barros  
Vivian Silva Mizutani  
Wilson Jose Macedo Barreto

### Estudantes regulares

Anderson Bussinger Ziede  
Daniel Burnier de Castro  
Débora Miranda Barretto  
Fábio de Araujo Bairros  
Laurenice Freire  
Ludimila de Oliveira Medrado

Marcelo Carvalho Bottazzini  
Marcelo Leitão Queiroz  
Marcus Watson Netto de Oliveira  
Michel Padilha da Silva Freitas  
Nara Ione Medina Schmitt  
Oscar Geoffroy Schmidt  
Stephan Paul  
Yves Gounot

### Institucionais regulares

01 dB- Stell Brasil Engenharia e Comércio Ltda  
Ackoustik Acústica e Projetos Ltda  
AMF Mineralplatten do Brasil  
Art Técnica Peças em Espumas Ltda  
Atenua-Som Ind. e Com. Ltda  
Boehringer Ingelheim do Brasil Quim.E Farm. Ltda  
Briza Acústica Ltda  
Duráveis Equip de Seg Ltda  
Faculdades Metropolitanas Unidas  
Fras-le S.A.  
Fundação Edson Queiroz  
Grom - Equip. Eletromecânicos Ltda  
Illbruck Sonex Industrial Ltda  
Instituto Metodista Izabela Hendrix  
Isobrasil Ltda  
Junseal Espumas Especiais Ltda  
Multitop Soluções Termoacústica  
NHT Noise Harshness Technology S/C Ltda  
PUCRS - Biblioteca Central  
Saint-Gobain Vidros S.A  
Signalworks Com. Import. E Exportação Ltda  
Sociedade de Educação Ritter dos Reis  
Sociedade de Ensino Superior Estácio de Sá  
Somax Tecnologia Acustica Ltda.  
Tecumseh do Brasil  
UNESC-Universidade do Extremo Sul Catarinense - Biblioteca Central Prof. Eurico Back  
UNIME - União Metropolitana de Educação e Cultura  
Univali – Biblioteca Central  
Vibranihil-Com Ind Amort de Vibrações  
Vibrasom Tecnologia Acustica Ltda.  
Vibtech Industrial Ltda

## Revistas ACÚSTICA E VIBRAÇÕES 1994 - 2005

Para receber esta revista semestral e as edições anteriores gratuitamente, associe-se à Sociedade Brasileira de Acústica (SOBRAC), preenchendo a ficha de inscrição nas páginas amarelas ou acessando [www.sobrac.ufsc.br/socios/associe/index.htm](http://www.sobrac.ufsc.br/socios/associe/index.htm). Temos exemplares limitados das revistas anteriores, os quais serão enviados para os sócios novos por ordem de solicitação.



### no.13 - julho 1994

- Análise de Posturas, Esforços e Vibrações nos Lixadores
- O Ruído e suas Interferências na Saúde e no Trabalho
- EPIs Auditivos: Avaliação pelo T.T.S. - Parte 1
- EPIs Auditivos: Avaliação pelo T.T.S. - Parte 2
- Critérios de Classificação Audiométrica para Trabalhadores com Perda Auditiva Induzida pelo Ruído
- A Importância do Monitoramento Audiométrico no Programa de Conservação Auditiva
- Sugestões sobre Adaptação dos Protetores Auditivos



### no.14 - dezembro 1994

- Controle Ativo de Ruído em Dutos
- Identificação das Fontes de Ruído Veicular por Medição de Intensidade Sonora
- Transmissão Via Aérea: Ruído Interno e Ruído Externo
- Simulação e Medições de Ruído de Aspiração de Motores em Laboratório
- Estudo Experimental de Vibração e Ruído Durante o Acionamento do Pedal da Embreagem
- Caracterização Acústica do Banco de Provas de Motores da Metal Leve Usando Intensidade Sonora
- Sistema de Exaustão: Fundamentos e Projetos
- Ensaios e Simulação Acústica de Escapamento Veicular Simples
- Simulação Numérica de Ruído Veicular Interno
- Redução de Ruído Interno em Ônibus Rodoviário
- Ruído Interno de Veículos Automotores: A Utilização do "Loudness"



### no.15 - julho 1995

- Controle de Ruído Industrial
- Plano Diretor de Ruído na Indústria Multi-Tarefa
- Dicas para Controle de Ruído
- Notícias: Programa Silêncio - Selo Ruído



### no.16 - dezembro 1995

- Dicas para Controle de Ruído
- Controle de Ruído de Máquinas
- Reativação da Produção de Normas em Acústica Arquitetônica e Ambiental
- Recomendações da Organização Mundial da Saúde sobre Ruído Industrial
- A Importância da Acústica e da Psicoacústica para a Audiologia: A Influência da Acústica das Salas de Aula na Percepção da Fala
- Resposta a Perguntas e Queixas com Relação a Audição e a Protetores Auditivos (Parte I, II e III)



### no.17 - julho 1996

- Progresso na Acústica de Edificações
- A Exigência de Repouso Auditivo Mínimo de 10 Minutos a cada 50 Minutos de Trabalho, Conforme a Norma Técnica do Estado de São Paulo
- O Uso de Materiais Absorventes no Controle de Ruído Industrial: Possibilidades e Limitações
- Dicas para Controle de Ruído

**no.18 - dezembro 1996**

- Aplicações do Controle Ativo do Som e Vibrações
- Ruído Ambiente em Portugal
- Comentários Sobre la Determinación de la Rigidez Dinámica de Materiales para Uso en Pisos Flotantes
- Dicas para Controle de Ruído

**no.19 - julho 1997**

- Efeitos do Ruído no Homem
- Avanços tecnológicos em protetores auditivos até 1995: Redução ativa de ruído, frequência/ amplitude-sensibilidade e atenuação uniforme (Parte I)

**no.20 - dezembro 1997**

- Novos Desenvolvimentos em Normalização Internacional
- 2ª Chamada: I Congresso Iberoamericano de Acústica, I Simpósio de Metrologia e Normalização em Acústica e Vibrações do Mercosul e 18º Encontro da SOBRAC

**no.21 - julho 1998**

- Avanços Tecnológicos em Protetores Auditivos até 1995
- Qualidade Acústica em Escritórios Panorâmicos
- Aposentadoria Especial por Ruído

**no.22 - dezembro 1998**

- Comparação Laboratorial em medição de Absorção Sonora em Câmaras Reverberantes
- O Ruído Incômodo Gerado nas Instalações Hidráulicas Prediais
- As Políticas Europeias sobre Ruído Ambiente e o Espaço Ibérico
- Medição e Avaliação de Ruído em Ambiente de Trabalho

**no.23 - julho 1999**

- Comparando Bananas com Laranjas
- Protetores Auditivos: Um Novo NRRsf
- Um Caso Prático: Silenciador para Roots
- Diagnósticos de PAIRO (Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional) pela nva NR-7 (Portaria 19 MTb. de 09/04/98)



**no.24 - dezembro 1999**

- Definição de metas de ruído para componentes veiculares via análise de qualidade acústica do veículo
- Estudo da Técnica de Intensidade Sonora: Procedimentos, Erros e Aplicações
- O Ruído na Indústria - Como Controlar
- Geração de Ruído em Válvulas de Controle



**no.25 - julho 2000**

- Efeito do Ruído no Homem Dormindo e Acordado
- Total Loss Factor in Building Acoustics - Measurement and Application
- Room Noise Criteria: the State-of-the-art in the Year 2000
- Poluição Sonora: Um levantamento de dados da cidade de Fortaleza



**no.26 - dezembro 2000**

- Um Exame das Revisões Propostas das Curvas de Referências (Critérios) para Ruído em Salas
- Actualizacion de Estudios sobre Ruido dentro del Plan Urbano Ambiental de la Ciudad de Buenos Aires
- Estado da Arte para Solução dos Problemas em Vibroacústica por Métodos Numéricos



**no.27 - julho 2001**

- Influência dos Protetores Auditivos na Inteligibilidade da Voz
- Efeitos do Ruído e de Vibrações no Homem
- Cursos e Laboratórios de Acústica: GVA/LARI



**no.28 - dezembro 2001**

- A Evolução da Acústica Veicular no Brasil
- The State of Art in Aircraft Acoustic Treatment Design
- Modelagem Numérica e Ensaio Experimentais de Silenciadores Veiculares
- Reavaliando as Métricas Psicoacústicas
- Some Considerations Regarding Loudness Evolution
- Analysis of Non-Stationary Noise Signals in Car Engines, Using Non-Stationary STSF
- Cursos e Laboratórios em Acústica: Laboratório de Ruídos e Vibrações Campo de Provas da Cruz Alta - GMB



**no.29 - julho 2002**

- Acústica das Salas de Aula: um recurso para criar ambientes de aprendizado com condições desejáveis de audibilidade



**no.30 - dezembro 2002**

- Uma Análise dos Efeitos Negativos da Lei 938/86 que dispõe sobre a Instalação de Campainhas de Garagem no Município do Rio de Janeiro
- Princípios de Acústica Musical aplicados a Clarinetas e Instrumentos de Sopros
- Critério aceitável de Isolamento de Parede-meia

**no.31 - julho 2003**

- Acústica de salas de aulas: Estudo de caso em duas escolas da rede privada do DF
- Soluções para a Redução da Exposição Ocupacional de Trabalhadores na Área Automotiva
- Resumos de Teses e Monografias

**no.32 - dezembro 2003**

- Ampliação da capacitação técnica dos laboratórios do campo de provas de Tatuí
- Efeito dos componentes veiculares na qualidade sonora
- Ferramentas teóricas e experimentais em vibroacústica
- Some considerations regarding loudness calculations
- Resumos de Teses e Monografias
- Congressos Nacionais e Internacionais

**no.33 - julho 2004**

- Controle de Ruído em Sistemas de Serras Circulares
- Quantificação e Controle à Exposição de Ruído dos Operadores Telefônicos
- Riscos à Audição de Trabalhadores Agrícolas: uma revisão da literatura
- Congressos Nacionais e Internacionais

**no.34 - dezembro 2004**

- Análise Estatística Comparativa do Ruído Urbano na Cidade de Curitiba
- Confiabilidade dos Métodos Clássicos de Análise de Falhas em Rolamentos na Indústria de Papel
- El Ruido en el Ordenamiento Territorial de la Comuna de Providencia. Chile 2001
- Análise do incômodo causado pelo ruído urbano em logradouros da cidade de Feira de Santana, Bahia, Brasil
- Congressos Nacionais e Internacionais
- Cursos e Laboratórios de Acústica

**no.35 - julho 2005 - Edição especial INTERNOISE 2005**

- mais de 600 resumos do congresso internacional INTERNOISE 2005