

Acústica & Vibrações

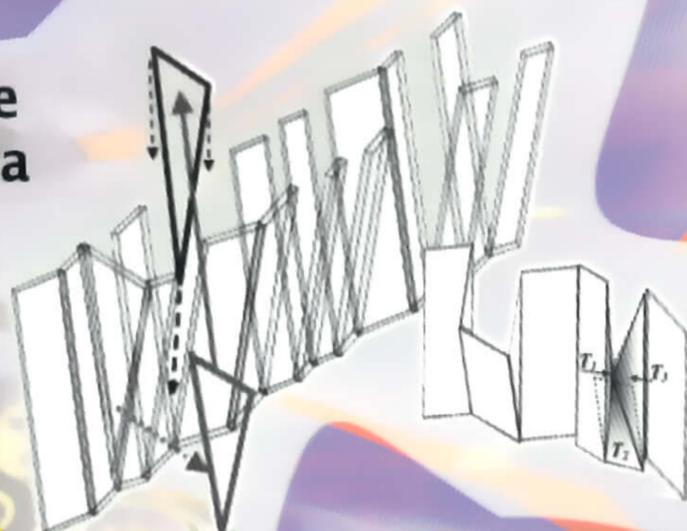
SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAE

JUNHO 2006 Nº37 REVISTA SEMESTRAL



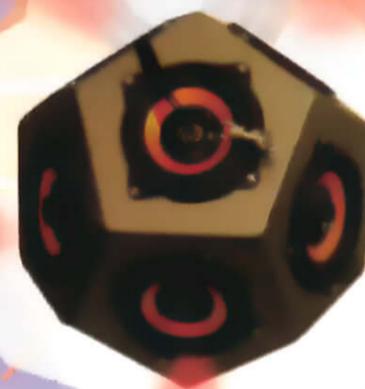
Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental

Introdução aos difusores de Schroeder e análise comparativa com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg



Qualidade sonora: conceitos básicos ilustrados com um exemplo da área automotiva

Um sistema de baixo custo para o aluno de acústica de salas



Avaliação de métodos de medição da função de transferência de fones de ouvido tipo circum-auricular

Expediente

Revista Semestral da
Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC

Cx. Postal 476 - CEP 88040-900
Florianópolis -SC- Brasil
www.sobrac.ufsc.br
e-mail:sobrac@acustica.org.br
Skype ID:sobrac_acustica
Tel/Fax: ++55 48 3269-9882

Diretoria SOBRAC 2006/2010

Presidente: Marco Antonio Nabuco de Araujo
nabuco@acustica.org.br

Vice-Presidente: Ana Cláudia Fiorini
fiorini@acustica.org.br

1º Secretário: Gilberto Fuchs de Jesus
gilberto@acustica.org.br

2º Secretário: Lilian Seligman Gracioli
lisegra@acustica.org.br

1º Tesoureiro: Roberto Jordan
jordan@acustica.org.br

2º Tesoureiro: Erasmo Felipe Vergara Miranda
efvergara@acustica.org.br

Secretaria Executiva: Patrícia Fernanda P. da Silva
patricia@acustica.org.br

Vanessa D. Cardoso
vanessa@acustica.org.br

Conselho Consultivo

Prof. Samir Gerges, UFSC

Prof. Moyses Zindeluk, COPPE/UFRJ

Prof. Fernando Castro Pinto, COPPE/UFRJ

Profª Elvira Viveiros, UFSC

Prof. Marco Vecci, UFMG

Mauricy C.R. de Souza, UFSC

David Akerman, Harmonia Acústica Ltda

Corpo Editorial Temporário da edição junho 2006

Stephan Paul

Editoração e Diagramação

Stephan Paul

st.paul@emc.ufsc.br

Design de Arte e Capa

William D'Andrea Fonseca

Sumário

Editorial 2

Artigos

Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação Experimental 3
Tenenbaum, R.A.; Camilo, T.S.

Introdução aos difusores de Schroeder e análise comparativa com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg 15
Mannis, J.A.; Manzolli, J.

Qualidade sonora: Conceitos básicos ilustrados com um exemplo da área automotiva 28
Leite, R.P.; Paul, S.

Um Sistema de Baixo Custo para o Aluno de Acústica de Salas 38
Portela, M.S.

Prévia de trabalho

Prévia de trabalho: Avaliação de métodos de medição da função de transferência de fones de ouvido tipo circumauricular 41
Zmijevski, T.R.L.; Fonseca W.D.; Silva Y.A.R

Informações

Congressos 42

Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES ... 44

Editorial

No dia 16 de fevereiro de 2006 a Diretoria eleita para o quadriênio 2006-2010 tomou posse em São Paulo na Sede do Instituto de Pesos e Medidas. Nessa ocasião, quando mais de 40 associados prestigiaram a Assembléia Geral de Posse, o ex-presidente Samir N. Y. Gerges apresentou um resumo das atividades desenvolvidas pela Sobrac no período de 2002-2006, onde se inclui a realização do Internoise 2005, o maior evento organizado pela nossa Sociedade desde sua criação em 1994, e que a projetou definitivamente no cenário internacional.

Na seqüência, a nova Diretoria reapresentou as propostas com as quais nos candidatamos para o próximo quadriênio, propostas estas que incluem a apresentação de um programa de certificação de profissionais para a medição de ruído, a transparência das contas da Sobrac, a realização dos eventos tradicionais da sociedade e ainda a revitalização da revista *Acústica & Vibrações*.

O colega Paulo Massarani (pmmassarani@inmetro.gov.br) irá coordenar os trabalhos de um Conselho Editorial Temporário-CET, cujas atividades se concentrarão principalmente na definição de um conjunto de critérios para a formação e funcionamento do Conselho Editorial da Sociedade Brasileira de Acústica, requisito fundamental para a solicitação de indexação da Revista da Sobrac junto aos organismos pertinentes. Apesar da missão bem determinada do CET, a edição de dezembro da Revista *Acústica & Vibrações* já deverá contar com artigos minimamente avaliados segundo os critérios que serão apresentados para aprovação em Assembléia Geral da Sobrac a ser realizar em novembro próximo em São Paulo. O número de julho de 2006 foi editado sem essas modificações nem tampouco a revisão editorial do CET.

Para formar o Conselho Editorial Temporário foram convidados mais de 40 especialistas de universidades, institutos de pesquisa, empresas privadas e consultores. A seguir estão listados os nomes, com a correspondente afiliação, dos 16 que aceitaram colaborar:

| | |
|---|---|
| Prof ^a Doris Ruth Lewis, PUC-SP | Prof. Fernando Pinto, COPPE/UFRJ |
| Prof ^a Beatriz Mendes, PUC-SP | Prof. Paulo Zannin, UFPR |
| Prof. Sylvio Bistafa, USP | Prof. Samir Gerges, UFSC |
| Prof ^a Stelamaris Rolla, Unicamp | Prof ^a Elvira Viveiros, UFSC |
| Marcio Avelar, Unicamp | Prof ^a Dinara Paixão, UFSM |
| Prof. Marco Vecci, UFMG | Prof. Roberto Tenenbaum, IPRJ/UERJ |
| Prof. Eduardo Buazer, UFMG | Marcelo Magalhães, FORD Brasil |
| Prof. Ricardo Musafir, COPPE/UFRJ | Sílvia Pinheiro da Silva Jr., GROM |

Uma nova página na Internet para a Sobrac deverá estar em funcionamento até meados de julho próximo. Esse trabalho está sendo organizada pelo 1º Secretário da Sobrac Gilberto Fuchs gilberto@acustica.org.br

Até a data de fechamento desse editorial a Sobrac contava com um quadro de 60 associados efetivos, 25 institucionais e 11 alunos em dia. Nossa meta é chegar ao dobro do número de sócios efetivos ainda em 2006 e aumentar o número de alunos significativamente, procurando a adesão de estudantes de cursos como fonoaudiologia, medicina e arquitetura.

Com essas medidas, e outras relativas à organização e promoção de eventos técnicos/científicos, como os encontros da Sobrac e mesmo congressos internacionais da magnitude do Internoise ou ICSV, esperamos consolidar a Sociedade Brasileira de Acústica como uma organização que congrega de forma bastante representativa profissionais e futuros profissionais das áreas de acústica e ciências das vibrações.

Marco Antonio Nabuco de Araujo
Presidente da Sobrac
nabuco@acustica.org.br

Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Teoria, Implantação Computacional e Validação Experimental

Camilo, T.S.*; Tenenbaum, R.A.†

*Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

†Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico, UERJ, Nova Friburgo, rtenenbaum@iprj.uerj.br

Resumo

A simulação numérica de acústica de recintos tem sido um dos mais importantes enfoques de pesquisa em acústica de salas. Suas principais vantagens, comparando-se à simulação por modelo reduzido, são o baixo custo, a rapidez na modelagem e remodelagem da sala e no tratamento de resultados. Este artigo apresenta um novo código computacional, denominado RAIOS 3, para predição numérica de acústica de salas, baseado na combinação de dois consagrados métodos numéricos. O modelo híbrido consiste na utilização do método de traçado de raios para simulação das reflexões especulares e do método de transição de energia modificado para simulação das reflexões difusas. O desempenho do modelo é avaliado, a partir dos resultados obtidos com uma sala padrão e validado experimentalmente na intercomparação com diversos outros softwares participantes, no Round Robin 3, promovido pelo PTB, Alemanha. Nessa comparação entre programas de simulação numérica, realizada em três fases de crescente complexidade, participam cerca de vinte concorrentes, dentre os quais alguns dos melhores programas comerciais de acústica de salas. O programa RAIOS 3 atingiu ótimos resultados, demonstrando a eficácia do modelo adotado e excepcional confiabilidade para aplicação prática.

Palavras chave: qualidade acústica de salas; medições acústicas em salas; salas com acústica variável

PACS no. 55.Ka, 55.Br, 55.Mc

1. Introdução

Com o recente crescimento da capacidade dos processadores, os computadores se tornaram capazes de calcular os mais diversos e complexos efeitos da propagação de ondas sonoras. Métodos numéricos transportam a realidade física para a linguagem computacional e, por isso, analisá-los detalhadamente se tornou uma necessidade. Os métodos mais consagrados são o de traçado de raios [1] o das imagens ou das fontes virtuais [2], o de traçado de cones ou de pirâmides [3] e o de transição de energia [4]. Visto que a acústica de uma sala envolve vários fenômenos pertinentes à propagação do som — como reflexão, absorção, difusão, difração, transmissão e interferência — sua predição correta nem sempre pode ser atingida utilizando-se apenas um dos métodos numéricos citados acima. Por essa razão, experimentos numéricos incorporando combinações destes têm sido realizados criando-se novos modelos de simulação, que são chamados métodos híbridos [5] [6]. Nos códigos computacionais para simulação acústica atualmente disponíveis, essa filosofia tem sido adotada, embora nem sempre com o devido cuidado. Além da modelagem da propagação sonora, deve-se tam-

bém modelar adequadamente outros elementos tais como fontes, receptores e superfícies de contorno da sala.

Uma das preocupações deste trabalho é focar na adequação dos modelos matemático-numéricos desses elementos à realidade física e à capacidade computacional atualmente existente. A título de exemplo, os modelos para fontes sonoras devem contemplar sua densidade espectral de potência. Usualmente, os programas modelam o conteúdo espectral da fonte pelo seu espectro de potência, discretizado em bandas de oitava. Essa discretização se encaixa com as aproximações propostas por normas, atinge taxas de erros satisfatórias e reduz consideravelmente o tempo de processamento, constituindo portanto uma modelagem adequada para fontes sonoras.

Um dos mais interessantes enfoques de pesquisa na área de acústica tem sido o fenômeno do espalhamento, também chamado difusão — embora não sejam, a rigor, a mesma coisa. Diversos experimentos subjetivos comprovam a importância desse fenômeno na qualidade acústica de um ambiente [7]- [9]. Acompanhando esses resultados, várias medições têm sido realizadas com o objetivo de compreender e modelar o fenômeno da difusão [10]- [15]. Atualmente, existem duas normas padronizando dois dos coeficientes que a quantificam. O primeiro deles é o coeficiente de espalhamento, definido pela norma ISO/WD 17487 (2001) [16], que determina a parcela de energia que é espalhada por direções distintas da reflexão especular. Baseada em um trabalho de Mommertz e Vorländer [10], esse coeficiente tem sido largamente adotado e mensurado

Recebido em 12 de novembro de 2005.

Aceito em 05 de junho de 2006.

Artigo inicialmente publicado no I Seminário Música Ciência Tecnologia, novembro de 2004, São Paulo. Para publicação na revista o artigo foi completamente revisto e ampliado.

para diversos materiais. O segundo é chamado de coeficiente de difusão e é definido pela norma AES-4id-2001 (2001) [17]. Esse coeficiente expressa o grau de uniformidade da distribuição angular da energia sonora espalhada.

Diversas tentativas de viabilizar a simulação das reflexões difusas têm sido implementadas, muitas vezes sem sucesso. Com esse objetivo decidiu-se desenvolver um método híbrido capaz de calcular essas reflexões com a maior precisão possível, dentro das limitações computacionais atuais. O traçado de raios é adotado para a simulação das reflexões especulares, enquanto um método de transição de energia modificado é utilizado para a simulação das reflexões difusas.

Dois métodos de simulação numérica serão discutidos, portanto, neste trabalho. O primeiro a ser apresentado será o método de traçado de raios e o segundo será o método de transição de energia. O principal objetivo desses métodos é encontrar a resposta impulsiva virtual da sala, da qual obtêm-se seus principais parâmetros acústicos [18]. A utilização do método de traçado de raios para a simulação das reflexões especulares e a adoção do método de transição de energia para a simulação das reflexões difusas será discutida e testada através do código computacional desenvolvido, denominado RAIOS 3.

2. Método de traçado de raios

Nesse método, a modelagem da onda sonora admite os pressupostos da acústica geométrica — essencialmente os mesmos da ótica geométrica — que admite raios acústicos retilíneos radiando a partir da fonte sonora. Cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da distância percorrida pela onda. Propagando-se em linha reta o raio vai sendo submetido aos efeitos dissipativos causados pela viscosidade do meio (ar) e pelas superfícies de contorno da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. Chama-se especular a reflexão que obedece a lei de Snell, isto é, o raio incidente, a normal à superfície e o raio refletido por esta estão no mesmo plano, com o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, como indica a Figura 1. Qualquer parcela da energia da onda sonora que se espalha propagando-se por direções distintas da especular é considerada como reflexão não-especular, ou reflexão difusa.

2.1. Modelagem da fonte

Emitindo-se um grande número de raios em todas as direções e modulando seu espectro de potência segundo sua direcionalidade, temos uma fonte virtual direcional, análoga às fontes reais. Vários modelos são propostos para se obter o máximo de homogeneidade na distribuição angular dos raios emitidos pela fonte. A modelagem para a fonte que apresenta os melhores resultados, segundo esse critério, se baseia na subdivisão geodésica do icosaedro regular. Cada uma das suas faces triangulares originais é

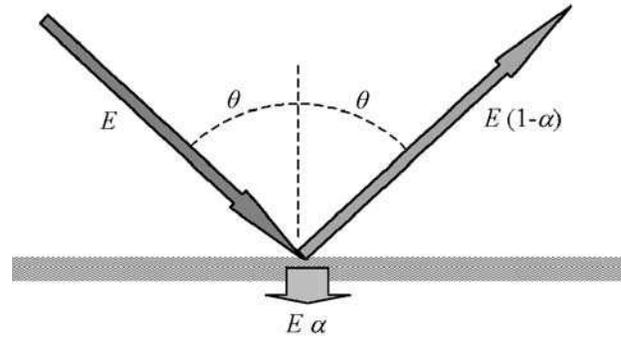


Figura 1: Reflexão especular

subdividida recursivamente em novos triângulos, aproximadamente equiláteros. Esse processo de subdivisão é ilustrado na Figura 2 e seu algoritmo é descrito por Lewer [5]. Após um número n de subdivisões das arestas do icosaedro, obtemos um número V de vértices igual a

$$V = 2 + 10n^2 \quad (1)$$

A partir da projeção desses vértices em uma superfície esférica de raio unitário concêntrica ao icosaedro, obtemos os cosenos diretores dos raios que serão emitidos. A Figura 3 ilustra um dos triângulos do icosaedro após 65 subdivisões e nos mostra uma excelente homogeneidade, mesmo para poucos pontos (~ 40 k).

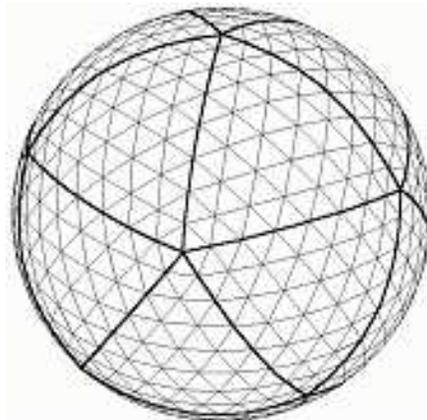


Figura 2: Subdivisão a partir do icosaedro ($n = 8$)

2.2. Modelagem das reflexões

Outro fenômeno que devemos dar atenção no modelo numérico é o da reflexão do raio acústico sobre uma superfície. O modelo proposto por Mommertz e Vorländer [10] no qual se baseia a norma ISO/WD 1747 (2001) [16] introduz o coeficiente de espalhamento, δ , que quantifica a

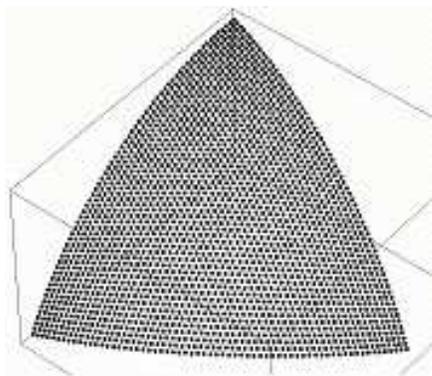


Figura 3: Subdivisão sobre um dos triângulos originais do icosaedro ($n = 65$)

parcela da energia refletida difusamente. Esse coeficiente varia de zero, para reflexão puramente especular, a um, para reflexão completamente difusa.

Não é recomendável, contudo, a aplicação do método de traçado de raios para a simulação de espalhamento, uma vez que esse fenômeno sugere que um raio se subdivide em diversos outros novos raios. Para se obter uma predição precisa seria necessário que cada raio gerasse centenas de milhares de outros no momento de sua reflexão. Isso nos leva a um crescimento exponencial do número de raios, exigindo alta capacidade de armazenamento de dados e de processamento, restringindo portanto a utilização do método. A utilização clássica do método de traçado de raios se restringe portanto apenas ao cálculo das reflexões especulares, inserindo nestas toda a energia associada às reflexões difusas, ou seja, fazendo $\delta = 0$.

Na Figura 1, E representa a energia transportada pelo raio. Para o cálculo da resposta impulsiva essa energia está distribuída em um pulso, e para o cálculo da distribuição da pressão sonora em regime permanente essa energia está distribuída uniformemente por unidade de tempo. Em ambos os casos, a energia do raio após várias reflexões é calculada pela expressão

$$E = \frac{E_F}{N_R} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (2)$$

onde E_F é a energia total emitida pela fonte, N_R é o número de raios, $D_{\alpha\beta}$ é a direcionalidade da fonte, α e β descrevem as coordenadas esféricas, γ é o coeficiente de absorção do ar, d é a distância percorrida pelo raio e α_i é o coeficiente de absorção da superfície i . Para fontes onidirecionais, naturalmente, $D_{\alpha\beta} = 1$.

3. Método da transição de energia

Esse método é também chamado de método dos caminhos aleatórios, da radiosidade ou ainda método dos pacotes de energia. Ele se baseia na troca de energia sonora entre as superfícies em intervalos regulares de tempo, iguais

ao tempo característico da sala, ou seja, $\tau = 4V/cS$. Esse intervalo é também chamado de tempo de transição. Corresponde ao tempo despendido pela onda sonora para percorrer o livre caminho médio da sala, ou seja, $l_m = c\tau = 4V/S$, onde V é o volume da sala e S a superfície total de seu contorno.

3.1. Modelagem da fonte

A idéia central do modelo é que todas as superfícies irradiam som para todas as restantes na proporção do ângulo sólido com que cada uma vê a outra. Nesse método, portanto, a fonte sonora distribui toda sua energia para as superfícies da sala e estas, por sua vez, irradiam para todas as outras, e assim sucessivamente. Modulando-se o espectro de potência da fonte segundo sua direcionalidade, tem-se uma fonte virtual direcional. A parcela da energia sonora emitida por uma fonte pontual F e recebida por uma superfície varia proporcionalmente com seu ângulo sólido em relação à fonte, segundo a relação

$$E_S = E_F \frac{\Omega_{FS}}{4\pi} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \quad (3)$$

onde Ω_{FS} é o ângulo sólido da superfície S com respeito ao ponto F .

O tempo médio de chegada da energia da fonte a cada superfície é $\tau/2$. Essa aproximação é, a princípio, um tanto grosseira, considerando desprezíveis eventuais diferenças nos tempos de chegada com respeito à média. Não nos esqueçamos, no entanto, que esse é um modelo estatístico de propagação sonora na sala. Uma vez que a energia da fonte é emitida, podemos representar a distribuição das energias recebidas nas n superfícies por uma matriz linha da forma $E_0 = (E_{01}, E_{02}, E_{03}, \dots, E_{0n})$, onde E_{0i} é a energia recebida inicialmente na superfície i .

3.2. Modelagem das reflexões e das superfícies

O primeiro passo na modelagem de uma superfície no método de transição de energia é a sua subdivisão seqüencial em elementos. Um dos cuidados necessários durante esse processo de subdivisão é o de atingir um valor médio aproximado para as áreas desses pequenos elementos de modo a se obter o máximo possível de homogeneidade no retalhamento das superfícies. Todas as superfícies nesse método são consideradas como difusores perfeitos, ou seja, $\delta = 1$, espalhando portanto a energia incidente por todas as direções do plano que contém a normal à superfície e o raio incidente.

A direcionalidade da energia refletida difusamente se baseia na lei dos cossenos de Lambert [15] conforme mostrado na Figura 4. Essa direcionalidade depende somente do ângulo de elevação em relação à superfície, podendo ser expressa pela relação simples:

$$S_\beta = 2 \sin \beta \quad (4)$$

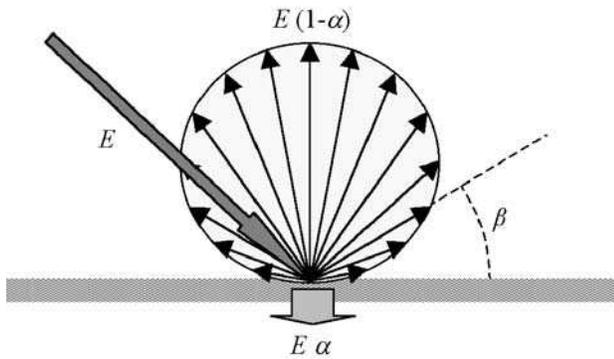


Figura 4: Reflexão difusa

Após o processo de retalhamento é preciso definir qual a influência energética de cada elemento de superfície em relação a cada um dos outros. Cada um desses elementos irá refletir a energia recebida para todos os outros elementos visíveis da sala, a partir de seu centro geométrico. A transição de energia de um elemento i qualquer para um outro elemento visível j é dada por

$$\psi_{ij} = (1 - \alpha_i) \frac{\Omega_{ij}}{2\pi} S_{\beta} e^{-\gamma d_{ij}} \quad (5)$$

Montando os elementos ψ_{ij} em uma matriz quadrada $n \times n$ tem-se uma matriz de transição de energia Ψ . Pode-se então encontrar a distribuição de energia nas superfícies após k transições através da equação matricial

$$E_k = E_0 \Psi^k \quad (6)$$

A cada iteração entre as superfícies ocorre também a captação nos receptores das energias refletidas, sempre associadas a um tempo médio de chegada de $\tau/2$.

4. Método híbrido

O método híbrido descrito a seguir utiliza uma combinação dos métodos descritos anteriormente como uma abordagem para simular os três fenômenos mais importantes da propagação do som em salas, que são a absorção, a reflexão especular e a reflexão difusa. É notório que os métodos de traçado de raios e de transição de energia variam sua acurácia em direções opostas com a variação do coeficiente de espalhamento δ das superfícies. Em outros termos, o método de traçado de raios funciona bastante bem para o cálculo das reflexões especulares, fornecendo resultados bastante precisos para as primeiras reflexões — tal como o método das imagens, porém a um custo computacional inferior. Contudo, mostra-se impreciso no cálculo da cauda reverberante da sala e em salas demasiadamente difusas. Por outro lado, o método das transições de energia modela razoavelmente bem salas muito difusas, sendo eficiente para o cálculo da cauda reverberante [4]. O

método híbrido utilizado adotará, em essência, o traçado de raios para a simulação das reflexões especulares e o método de transição de energia para a simulação das reflexões difusas, com superposição dos resultados para o cálculo da resposta impulsiva.

4.1. Processamento das reflexões especulares

O cálculo da resposta impulsiva nesse método ocorre em duas etapas. Primeiramente processam-se as reflexões especulares, armazenando durante esse processamento as informações que serão usadas posteriormente no cálculo das reflexões difusas. Emitido por uma fonte virtual, um raio vai sendo submetido aos efeitos causados pelas superfícies de contorno enquanto simultaneamente é feita a identificação de sua reflexão em um elemento de superfície. Ao incidir em um desses elementos, o raio terá seu espectro de potência remodulado pelo espectro de absorção e agora também pelo espectro de espalhamento dessa superfície. A energia do raio após n reflexões é calculada pela expressão

$$E = \frac{E_F}{NR} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \prod_{i=0}^n (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i) \quad (7)$$

A Figura 5 ilustra as parcelas da energia incidente que se distribuem em energia absorvida, energia refletida especularmente e energia refletida difusivamente (espalhamento).

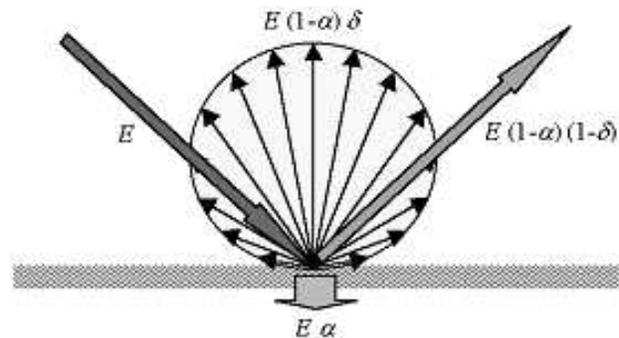


Figura 5: Efeito combinado de reflexão especular e difusa

A esse elemento, onde ocorreu a incidência, será acrescentada uma parcela da energia do raio associada a seu tempo de chegada, dada pela expressão recursiva

$$E_{i,t} = E_{i,t} + E(1 - \alpha_i)\delta_i, \quad (8)$$

onde t é o tempo de chegada do raio no elemento. Armazenando, de forma discretizada, a energia em cada elemento ao longo do tempo obtemos a matriz retangular E_D , $n \times T_{60}$, onde n é o número total de elementos de

superfície e T_{60} é o tempo de reverberação previamente estimado, em milissegundos, tem-se, então

$$E_D = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & \dots & E_{1,T_{60}} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} & \dots & E_{2,T_{60}} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & \dots & E_{3,T_{60}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & \dots & E_{n,T_{60}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

A cada reflexão do raio em um dos elementos a matriz E_D é alterada na posição do elemento que foi atingido e do tempo de incidência. Dessa forma, encontramos ao final de todo o processamento do traçado de raios uma matriz E_D inicial que representa a distribuição temporal e espacial da energia difusa que será refletida na segunda etapa da simulação. Nesse método, não se considera que a energia refletida difusamente venha a sofrer novas reflexões especulares. Dessa forma encontra-se, ao final da primeira etapa, apenas a resposta impulsiva specular $h_e(t)$ da sala.

4.2. Processamento das reflexões difusas

Na segunda etapa da simulação ocorre o processamento das reflexões difusas. A partir da matriz E_D inicial calculam-se as transições de energia entre os elementos de superfície da sala. Inicia-se o processamento emitindo a energia de todos os n elementos de superfície da coluna $t = 1$ a todos os outros elementos visíveis da sala, ou seja, aqueles para os quais o ângulo sólido é positivo, segundo a Eq. (5). Cada um dos elementos que recebe parte dessa energia refletida, a receberá em tempo distintos, ou seja em colunas distintas da matriz E_D . Esses elementos, nos respectivos instantes, terão suas energias incrementadas.

A transição de energia difusa de um elemento i , refletida no instante t , para um outro elemento j , recebida no instante $t + \tau$, é expressa por

$$E_{j,t+\tau} = E_{j,t+\tau} + E_{i,t}\psi_{ij}, \quad \text{onde } \tau = d_{ij}/c. \quad (10)$$

Percorrendo a matriz E_D , de $t = 1$ até $t = T_{60}$, e realizando a iteração dada pela Eq. (10), obtém-se a resposta impulsiva difusa da sala, $h_d(t)$. A resposta impulsiva $h(t)$ virtual da sala será, então,

$$h(t) = h_e(t) + h_d(t) \quad (11)$$

5. Implementação numérica

O código numérico que traduz o método híbrido foi elaborado em linguagem C++ e implementado em plataforma Windows, para microcomputador pessoal. A interface com o usuário é extremamente amigável, estando totalmente baseada em computação gráfica. A Figura 6 mostra a tela principal do programa RAIOS 3.

São dados de entrada para o programa: as informações de cada fonte (espectro de potência por banda de oitava,

direcionalidade, posição, orientação, número de raios emitidos, N_R , e outras secundárias); as informações de cada receptor (diâmetro, posição e outras secundárias); as informações da geometria da sala (tamanho, posição, orientação e material de cada plano, ao qual estão associados coeficientes de absorção e de espalhamento por banda de oitava nas seis bandas de 125 a 8000 Hz); as condições atmosféricas (temperatura, umidade e pressão barométrica); o critério de parada ou decaimento máximo, ΔL , em dB; o número de elementos para a discretização espacial, N_E ; e a discretização desejada para a resposta impulsiva, Δt , em ms. Valores típicos para uma simulação com razoável nível de precisão em uma sala de geometria complexa são: $N_R = 500$ k, $\Delta L = 60$ dB, $N_E = 1$ k e $\Delta t = 1$ ms.



Figura 6: Tela principal do código computacional RAIOS 3

O programa apresenta cinco módulos de tela, ou vistas, como indicado na Figura 6, sendo a maior o módulo de edição da sala, a superior direita para a entrada dos dados, a inferior direita constitui um módulo de comandos, a inferior central consiste num módulo de visualização gráfica dos dados de entrada e o módulo inferior esquerdo apresenta os resultados obtidos, segundo diversas janelas sequenciais. No módulo de entrada, é possível ainda calcular os tempos de reverberação segundo as fórmulas aproximadas de Sabine, Eyring e Fitzroy.

Essencialmente, o programa determina a resposta impulsiva quadrática (ecograma) da sala para o par fonte-microfone selecionado. A partir daí, a curva de decaimento é obtida. Os parâmetros de qualidade acústica calculados pelo programa são: T_{30} , EDT , D_{50} , C_{80} , TS , G , LF e LFC , para cada banda de frequência entre 125 Hz e 4 kHz, tal como definidos pela norma ISO 3382 [18] A definição, D_{50} , o fator de clareza, C_{80} , e o tempo central, TS , demandam a obtenção da resposta impulsiva da sala (RI). Para a determinação do tempo de reverberação, T_{30} , e do tempo de decaimento inicial, EDT , é necessário,

além da resposta impulsiva, obter-se as curvas de decaimento. Finalmente, para se obter as frações de energia lateral, LF e LFC , é preciso ainda ponderar a energia sonora segundo sua direção de chegada.

6. Resultados obtidos

Apresentam-se, a seguir, alguns resultados obtidos pelo programa RAIOS 3, para uma sala de referência (estúdio de música), tal como a ilustrada na Figura 6.

As Figuras 7 a 10 mostram os invólucros das respostas impulsivas, em pressão quadrática, da sala simulada obtida pelo método híbrido. A Figura 7 ilustra a RI referente ao processamento das reflexões especulares, enquanto que a Figura 8 mostra a RI referente ao processamento das reflexões difusas. Note que as escalas são distintas. Finalmente, superpondo ambas, obtemos a RI final da sala, apresentada na Figura 9. Observe, na Figura 10, que as curvas de decaimento por bandas de oitava obtidas a partir RI híbrida apresentam uma linearidade compatível com a difusividade da sala.

A queda súbita que uma das curvas da Figura 10 apresenta corresponde ao que efetivamente sucede ao levantarmos curvas de decaimento a partir de resultados experimentais em salas.

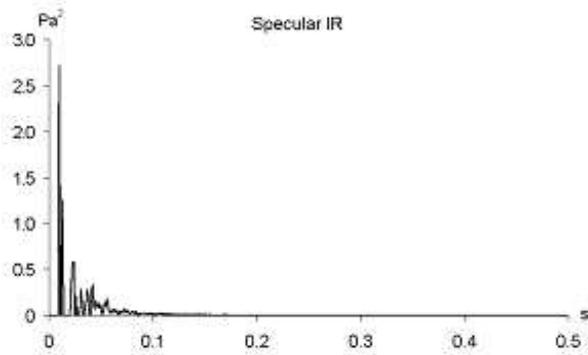


Figura 7: RI especular (parte inicial)

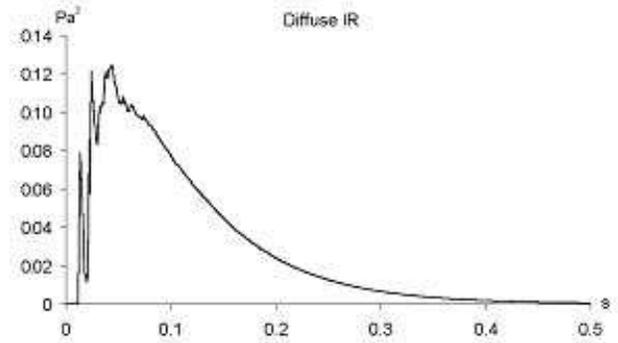


Figura 8: RI difusa (parte inicial)

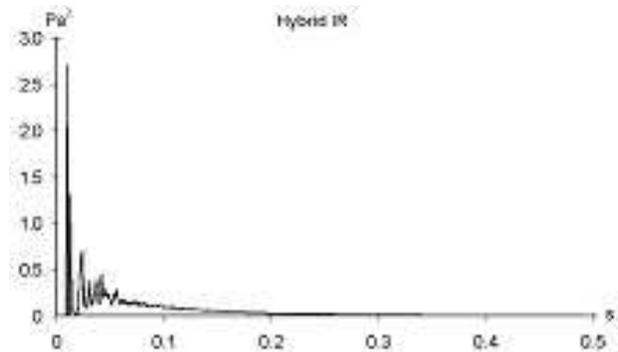


Figura 9: RI híbrida (parte inicial)

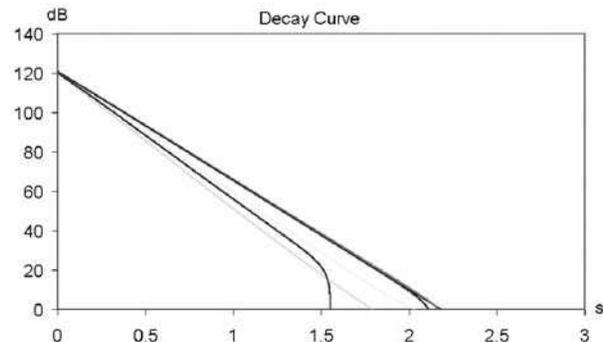


Figura 10: Curvas de decaimento por banda de oitava. A declividade cresce com a frequência

7. Validação do código computacional

O uso do computador para predição da qualidade acústica de salas tem sido cada vez mais usual entre arquitetos e acústicos. Diversas técnicas numéricas para a modelagem da propagação do som, da fonte e dos receptores têm sido desenvolvidas e testadas com a finalidade de aproximar os resultados simulados dos experimentais. Para os desenvolvedores de softwares, entender as causas dessas diferenças é de fundamental interesse.

Essa foi a motivação do Departamento de Acústica do PTB (Physikalisch-Technischen Bundesanstalt), Alemanha, realizar, em 1994, o primeiro projeto de intercomparação de simuladores numéricos, denominado Round Robin (RR1), o qual teve 16 participantes de 7 diferentes países. A sala utilizada como padrão de simulação foi um auditório localizado no próprio PTB, o qual deveria ter seus parâmetros T_{30} , EDT , D_{50} , C_{80} , TS , G , LF e LFC calculados apenas para a banda de oitava de 1 kHz. Os resultados obtidos demonstraram discrepâncias tão grandes

entre os diferentes participantes que, a princípio, uma predição computacional confiável para esses parâmetros parecia mesmo impossível. Entre 1996 e 1998 outra intercomparação de programas, o Round Robin 2 (RR2), com 16 participantes de 9 diferentes países, em um total de 13 diferentes programas, foi organizada pelo mesmo instituto. Dessa vez o ambiente examinado foi a sala de concertos ELMIA HALL, localizada em Jönköping, Suécia. Os resultados foram muito melhores dos que os encontrados no RR1, porém a complexidade da geometria da sala introduziu diversos outros problemas.

Por essa razão em 1999 decidiu-se iniciar uma nova versão desse evento, o Round Robin 3 (RR3), utilizando-se uma sala de geometria relativamente simples. A sala adotada foi um estúdio de música localizado no próprio PTB, a qual foi simulada em três fases de crescente complexidade. Finalizado em julho de 2002, o RR3 teve 21 participantes de 14 diferentes países, em um total de 10 diferentes programas. Ótimos resultados foram encontrados por alguns dos participantes, confirmando os programas de simulação numérica como uma ferramenta já confiável para o projeto acústico de salas.

O código computacional RAIOS 3 foi um dos programas participantes em todas as três fases do RR3, sendo o único representante da América Latina presente.

7.1. O Round Robin 3

Na primeira fase do RR3 o estúdio de música foi modelado em uma simples configuração. Suas paredes, teto e piso foram modelados em forma plana com coeficientes de absorção e espalhamento uniformes para todas as 6 bandas de frequência simuladas (de 125 Hz a 4 kHz). Duas posições de fontes e três posições de receptores, num total de seis combinações, foram fornecidas. A Figura 11 mostra a geometria adotada nessa fase. Essa simplificação da geometria foi fornecida pelo próprio PTB, de modo que todos os programas rodaram sobre rigorosamente os mesmos dados.

Na segunda fase os coeficientes reais de absorção foram adicionados, assim como um aumento no detalhamento da geometria, conforme mostrado na Figura 12. Duas situações compuseram essa fase: sala com cortinas abertas e sala com cortinas fechadas, duplicando portanto o número da situações a serem simuladas.

Finalmente, na fase 3, todos os detalhes do design da sala foram fornecidos, incluindo os perfis do teto e parede difusoras, conforme mostrado na Figura 13. As duas fases anteriores serviram como uma preparação inicial para os participantes, sendo utilizadas como um objeto de estudo para o desenvolvimento de seus programas para a última fase. Os resultados da intercomparação, que serão avaliados e divulgados pelo coordenador do RR no periódico especializado *Acta Acustica united with Acustica*, em futuro próximo, serão os calculados nessa última fase. Nas fases 1 e 2 versões anteriores do programa (RAIOS 2 e RAIOS 2.2) foram utilizadas. Essas versões não computavam os

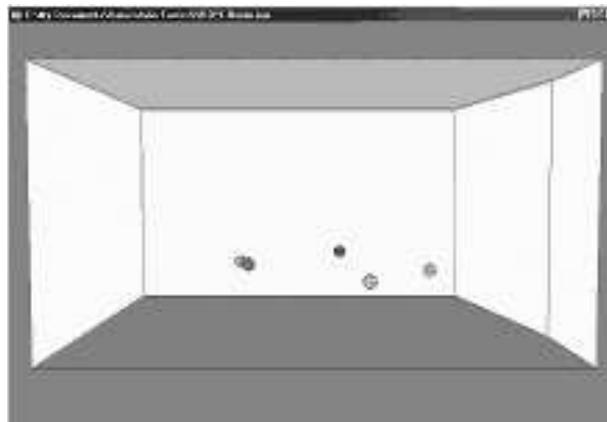


Figura 11: Sala da fase 1 do Round Robin 3

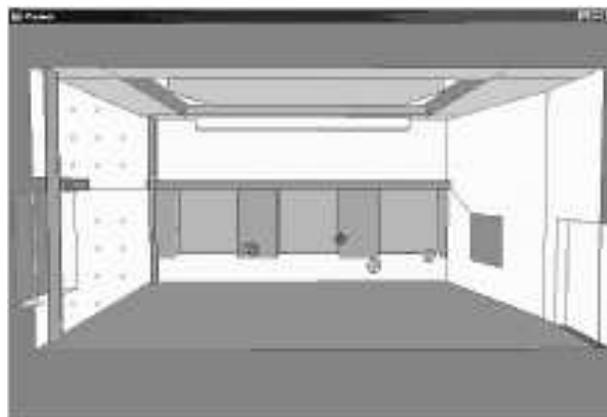


Figura 12: Sala da fase 2 do Round Robin 3

efeitos da difusão. No entanto, na fase final e mais próxima da sala real, foi utilizado o RAIOS 3 com as implementações já descritas.

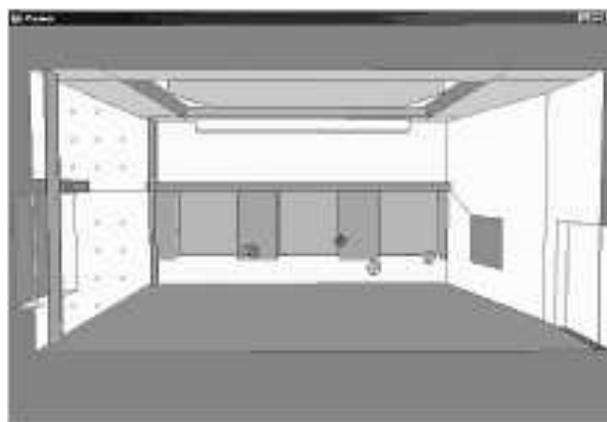


Figura 13: Sala da fase 3 do Round Robin 3

Cada um dos programas participantes recebeu um número de identificação, conhecido apenas pelos organizadores do evento e pelo próprio participante. O número 16 serviu de identificação para o RAIOS 3. Ao final de cada fase foi divulgado, utilizando-se essa identificação, os resultados de todos os participantes, de modo que cada um pudesse verificar como se portavam suas simulações face aos concorrentes.

Ao final da última fase foram também fornecidos os resultados das medições realizadas no estúdio de música do PTB. O RR3 serviu, portanto, como uma criteriosa validação experimental dos atuais programas de simulação numérica de acústica de salas.

7.2. Principais resultados obtidos pelo programa RAIOS 3

Os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3, para todas as posições de fonte e receptor e em função da banda de frequência, estão resumidas nas Figuras 14 a 19. Os resultados completos estão disponíveis na página do PTB [19]. Nessas figuras vemos alguns resultados para os parâmetros T_{30} , C_{80} e TS .

Nessas figuras, a linha cheia preta grossa representa os resultados experimentais obtidos pelo próprio grupo de acústica do PTB; a linha pontilhada preta grossa traduz os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3; as demais linhas finas reproduzem os resultados obtidos pelos outros programas. Na figura 14, vê-se uma legenda relacionando as linhas com os respectivos participantes, identificados exclusivamente por um número. Como não está em discussão, neste trabalho, o resultado de cada programa participante mas, tão somente, os resultados obtidos pelo RAIOS 3 confrontado com as medições, o restante das linhas (as finas) dão um panorama geral do posicionamento do nosso programa face aos demais. O tempo de processamento para a obtenção desses resultados em um micro-computador com processador Athlon de 1.2 GHz, foi de aproximadamente 1h30', exigindo aproximadamente 100 Mbytes de memória. Com a tecnologia disponível para computadores pessoais atualmente (2006), esse tempo reduz-se a cerca de 10 minutos com os parâmetros de programação selecionados para a máxima precisão.

A Figura 14 mostra o tempo de reverberação da sala, traduzido pelo parâmetro T_{30} , nas seis combinações fonte-receptor, na banda de frequência de 2 kHz, sala com cortinas fechadas. Observa-se que o resultado que mais se aproxima da curva experimental é o do RAIOS 3. Note-se também que todas as curvas aproximam-se dos valores reais por baixo. Provavelmente isso se deve à dificuldade de se simular campos razoavelmente difusos, como o apresentado pela sala em estudo, e comprova o acerto do método híbrido adotado.

Os resultados comparativos de T_{30} para a fonte 1 e o receptor 3, em todas as bandas de oitava, para a sala com cortinas fechadas, estão mostrados na Figura 15. Agora

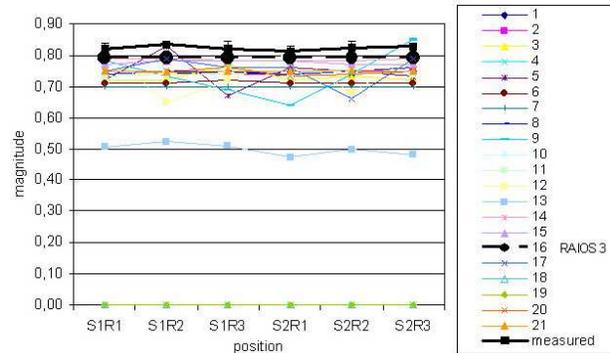


Figura 14: T_{30} em 2 kHz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas fechadas

observa-se que em baixa frequência (125 a 500 Hz) os resultados obtidos pelo programa aproximam-se por cima dos dados experimentais, enquanto em alta frequência ocorre o oposto. Mesmo assim, os valores estão bem próximos e os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3 estão entre os melhores.

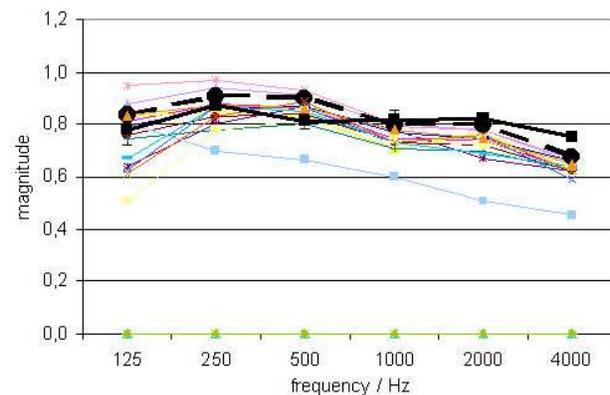


Figura 15: T_{30} para fonte 1 e receptor 3 em cada banda de frequência, cortinas fechadas

A Figura 16 mostra os valores comparativos do fator de clareza da sala, C_{80} , para todas as combinações de fontes e receptores, na banda de 250 Hz, sala com cortinas abertas. Esse parâmetro é mais sensível às flutuações da resposta impulsiva da sala e, naturalmente, apresentou maiores discrepâncias entre os programas, para todos os pares fonte-receptor. Aqui, mais uma vez, os resultados do programa RAIOS 3 mostraram-se mais confiáveis do que a esmagadora maioria dos programas concorrentes. O fator de clareza da sala é, portanto, bem avaliado pelo simulador computacional.

A Figura 17 apresenta a variação do mesmo fator de clareza, C_{80} , agora por banda de oitava, para a fonte 2 e receptor 2, sala com cortinas abertas. O caráter geral da figura é similar ao da anterior, ou seja, encontra-se uma

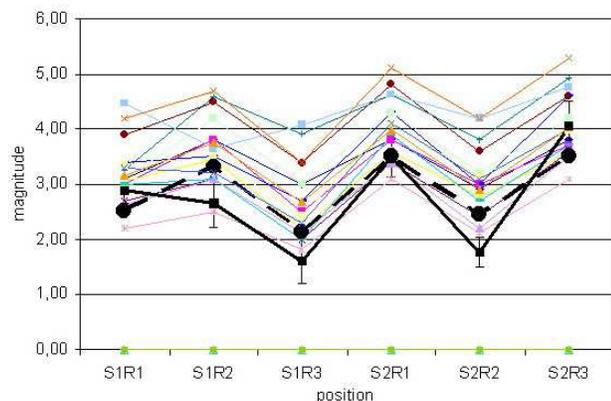


Figura 16: C_{80} em 250 Hz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

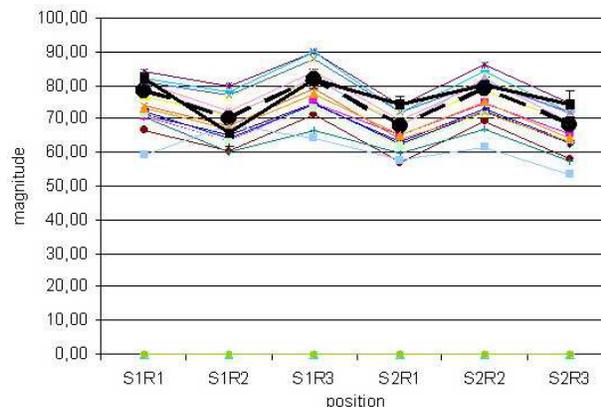


Figura 18: TS em 1 kHz para cada combinação entre fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

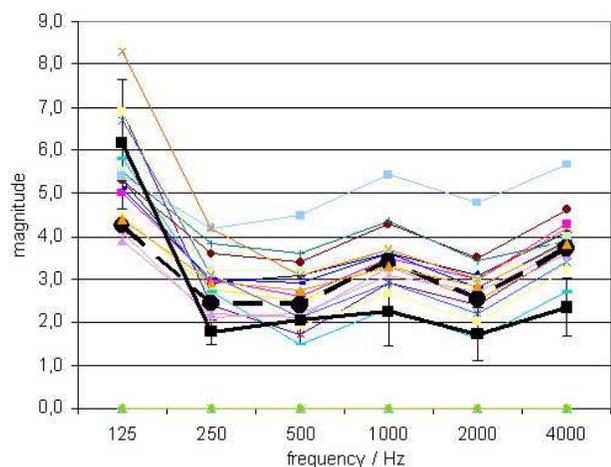


Figura 17: C_{80} para fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

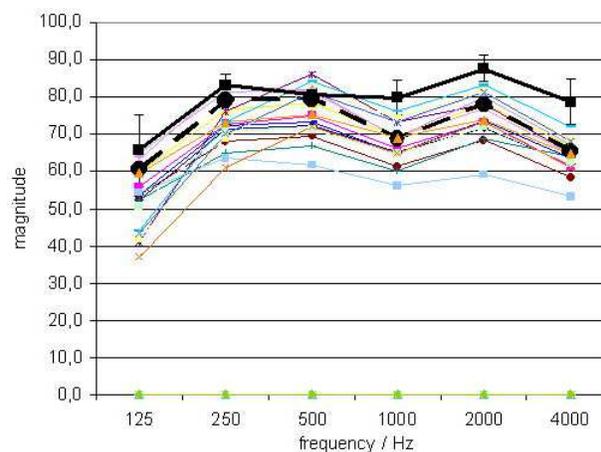


Figura 19: TS para a fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

discrepância muito grande de resultados entre os diversos programas participantes, situando-se o programa RAIOS 3 numa posição privilegiada com relação aos resultados experimentais, exceto na banda de 125 Hz. Cabe aqui um comentário. Nessa faixa de frequência, predomina o modelo modal de salas — que, presume-se, nenhum dos programas participantes utiliza. Portanto, nessa região, todos os programas apresentam resultados imprecisos e o código computacional RAIOS 3 não constituiu exceção.

A variação espacial do parâmetro acústico denominado tempo central, TS , para a frequência de 500 Hz e sala com cortinas abertas é plotada na Figura 18. Aqui, observa-se também uma variância bastante grande; por exemplo, na posição S1R3, os resultados variam de 65 a 90 ms. Novamente, o programa RAIOS 3 apresentou resultados bastante próximos dos experimentais para todas as posições de fonte e receptor.

Finalmente, os resultados de TS para a fonte 2 e microfone 2, nas seis bandas de oitava e sala com cortinas abertas é mostrado na Figura 19. Observa-se que os resul-

tados obtidos pelo RAIOS 3 são excelentes nas bandas de 125, 250 e 500 Hz; contudo, afastam-se nas três bandas mais altas, em cerca de 10 dB.

Embora os resultados apresentados constituam apenas uma amostra das planilhas Excel encontráveis no site do PTB [19], já se pode concluir que, efetivamente, os resultados de validação do programa foram excepcionais, mostrando o acerto do método híbrido escolhido, bem como a qualidade e eficiência de sua implementação computacional.

8. Erros médios relativos

Uma análise comparativa simples dos resultados dos programas participantes pode ser feita através do erro médio relativo. Para cada um dos participantes da 3ª fase — 17 ao todo; alguns programas não participaram dessa última fase — e para cada um dos nove parâmetros acústicos requeridos, foi computada a média dos erros médios, rela-

tivos às medições, para todas as seis combinações fonte-receptor e para todas as seis bandas de frequência. Isso nos fornece, mesmo que grosseiramente, um ranking que compara a precisão dos resultados de simulação dos programas participantes. Para o cálculo do parâmetro $IACC$ apenas cinco participantes apresentaram resultados, sendo portanto excluído da estatística a seguir. Para esse cálculo, ainda, o participante de número 13 foi descartado por conta da inconsistência de seus resultados. A tabela 1 apresenta os erros médios relativos de cada participante para as configurações: cortinas abertas, cortinas fechadas e a média de ambas. As quatro primeiras colocações estão marcadas com as tonalidades de cinza indicadas. As Figuras 20 e 21 nos mostram, em gráficos de barras, o resultado geral de cada participante. Nas Figuras 20 e 21, o resultado do programa RAIOS 3 é o quarto contando a partir da direita, e as alturas das barras indicam que quanto menor (o erro médio relativo) melhor.

Observando a Tabela 1 e as Figuras 20 e 21, conclui-se que, retirando-se do cômputo dos resultados o cálculo da correlação cruzada interaural, $IACC$, o programa RAIOS 3 apresentou o segundo melhor resultado global do Round Robin 3, credenciando-se como um simulador bastante confiável.

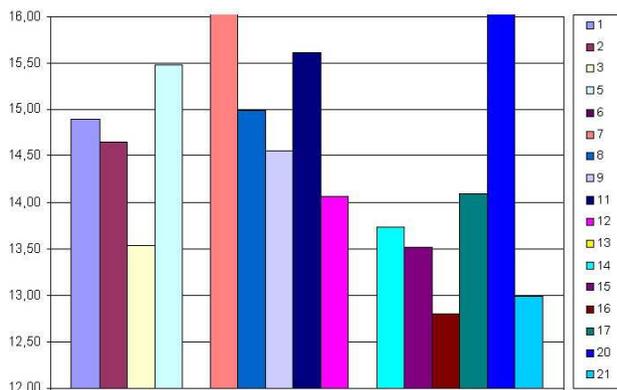


Figura 20: Erro médio relativo do parâmetro T_{30} ao LF

9. Conclusões

A principal desvantagem do método de traçado de raios é a necessidade de um grande número de raios para se calcular corretamente a parte intermediária e final da resposta impulsiva de uma sala. Ao contrário, o método de transição de energia, utilizando-se de um tratamento estatístico para a propagação do som no ambiente, demonstra grande simplificação nos cálculos e a diminuição da exigência de capacidade de processamento para uma simulação mais correta da cauda reverberante. A combinação desses dois métodos numéricos demonstrou apresentar excelentes resultados, o que pôde ser verificado na validação

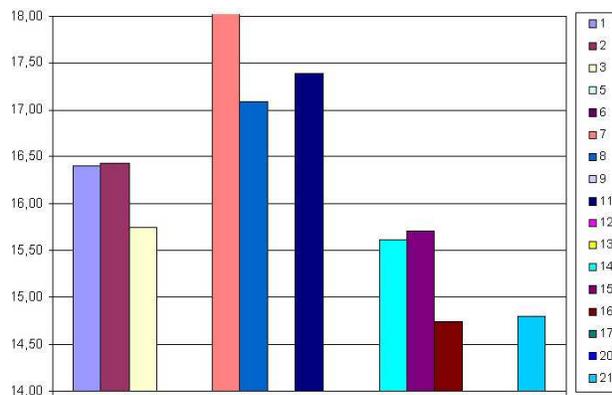


Figura 21: Erro médio relativo do parâmetro T_{30} ao LFC

do RR. As curvas de decaimento calculadas também apresentam grande linearidade, o que ocorre nas curvas reais medidas em salas difusas. Em especial, a linearidade encontrada ao final da curva de decaimento confirma uma simulação precisa do campo sonoro mesmo para a parte final da RI.

Devido a atual limitação dos processadores, diversas técnicas têm sido propostas para simular o efeito das reflexões difusas, muitas delas considerando apenas a tendência à aleatoriedade dessas reflexões. O algoritmo de difusão apresentado se baseia na atual formulação teórica do fenômeno, e mostrou ser suficiente para simular a difusividade de uma sala. A fusão desse algoritmo com o método de traçado de raios, formando o algoritmo híbrido utilizado no programa RAIOS 3, mostrou bastante confiabilidade posicionando-o como o segundo melhor programa entre os participantes do RR3, segundo a estatística apresentada acima.

O programa possui ainda uma poderosa saída gráfica que simplifica a edição, modificação e visualização da sala. Rodando em ambiente Windows, o programa RAIOS 3 se apresenta extremamente amigável e todos seus recursos podem ser vistos e acionados em uma área reduzida. Atualmente o programa importa arquivos DXF (*Drawing eXchange Files*), padrão internacional para troca de arquivos gráficos entre programas (AutoCad, entre outros), de modo a facilitar sua utilização e propiciar maior interação com arquitetos, acústicos e outros profissionais. O tempo de cálculo também foi substancialmente reduzido por meio da implantação de alguns algoritmos otimizados.

O ponto crucial no método híbrido adotado é justamente o seu ponto de corte, que depende muito fortemente dos coeficientes de espalhamento das superfícies da sala. Na prática, sabemos que tabelas de coeficientes de espalhamento de materiais ainda não estão tão disponíveis como, por exemplo, tabelas de coeficientes de absorção — embora estas também não sejam muito confiáveis devido a erros na norma para sua medição [20] [21]. Resulta que se os dados de entrada são imprecisos ou mesmo in-

Tabela 1: Erros médios relativos para todas as combinações fonte-receptor e bandas de frequência

RELATIVE MEAN ERROR (%)

For all source-receiver combinations and frequency bands

vs5: distribuição de D'Lambert para espalhamento e transmissão, sem transmissão nas cortinas. 400K raios e 800 elementos



| OPEN CURTAINS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PARTICIPANT | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 20 | 21 |
| T30 | 10,16 | 8,98 | 5,38 | 15,08 | 12,02 | 13,78 | 9,12 | 10,62 | 11,26 | 11,04 | 10,70 | 8,89 | 6,61 | 7,39 | 12,30 | 13,58 | 7,19 |
| EDT | 12,70 | 12,23 | 8,97 | 12,73 | 18,33 | 15,33 | 11,81 | 9,53 | 13,04 | 11,32 | 24,19 | 11,45 | 12,37 | 9,76 | 10,35 | 16,16 | 10,73 |
| D | 12,23 | 12,41 | 9,47 | 11,14 | 17,25 | 16,87 | 12,27 | 10,30 | 13,84 | 9,31 | 26,24 | 9,56 | 9,01 | 10,44 | 9,89 | 15,44 | 10,44 |
| C | 43,81 | 40,50 | 27,44 | 31,76 | 62,31 | 58,55 | 40,92 | 26,89 | 45,40 | 28,56 | 82,56 | 25,72 | 26,75 | 29,60 | 28,90 | 51,23 | 35,59 |
| TS | 15,36 | 14,36 | 9,15 | 13,95 | 21,14 | 19,82 | 15,00 | 12,41 | 16,54 | 12,64 | 22,14 | 9,76 | 8,63 | 10,26 | 12,03 | 19,23 | 12,53 |
| G | 4,24 | 4,10 | 3,84 | 6,61 | 4,62 | 5,74 | 3,96 | 8,42 | 4,24 | 6,81 | 3,26 | 4,16 | 3,90 | 4,29 | 6,97 | 4,57 | 3,80 |
| LF | 18,75 | 20,52 | 24,07 | 22,07 | | 57,30 | 21,46 | 21,91 | 20,84 | 20,17 | 61,55 | 23,44 | 24,76 | 20,44 | 21,10 | 18,46 | 17,42 |
| LFC | 22,95 | 25,04 | 26,85 | | | 45,16 | 25,69 | | 25,83 | | 21,18 | 25,56 | 27,86 | 24,52 | | | 21,51 |
| IACC | 26,13 | 18,81 | | | | | 24,18 | | 21,74 | | 39,83 | 21,09 | | | | | |
| MEAN T30-LF | 16,75 | 16,16 | 12,62 | 16,19 | | 26,77 | 16,36 | 14,30 | 17,88 | 14,26 | 32,95 | 13,28 | 13,15 | 13,17 | 14,50 | 19,81 | 13,96 |
| MEAN T30-LFC | 17,53 | 17,27 | 14,40 | | | 29,07 | 17,53 | | 18,87 | | 31,48 | 14,82 | 14,99 | 14,59 | | | 14,90 |

| CLOSED CURTAINS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PARTICIPANT | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 20 | 21 |
| T30 | 8,82 | 8,59 | 9,06 | 13,52 | 10,47 | 11,14 | 8,11 | 14,24 | 8,69 | 14,01 | 27,08 | 9,58 | 8,50 | 7,84 | 11,02 | 13,82 | 7,54 |
| EDT | 13,68 | 14,48 | 14,96 | 12,51 | 14,92 | 14,08 | 12,85 | 12,24 | 13,22 | 11,86 | 26,98 | 16,72 | 16,64 | 14,38 | 11,73 | 11,55 | 13,16 |
| D | 9,02 | 8,70 | 8,98 | 10,51 | 9,50 | 10,16 | 8,27 | 13,99 | 8,96 | 11,06 | 12,95 | 9,08 | 8,47 | 7,78 | 11,19 | 9,15 | 7,92 |
| C | 19,24 | 18,17 | 20,70 | 19,87 | 22,57 | 22,48 | 17,63 | 21,45 | 18,99 | 19,28 | 43,82 | 17,47 | 17,12 | 15,47 | 19,67 | 19,29 | 16,53 |
| TS | 12,21 | 11,86 | 12,95 | 15,39 | 14,58 | 13,35 | 11,46 | 14,00 | 12,27 | 13,71 | 21,61 | 12,95 | 11,97 | 11,02 | 13,60 | 13,77 | 10,84 |
| G | 4,49 | 4,48 | 4,50 | 5,42 | 4,57 | 4,20 | 4,50 | 6,62 | 4,64 | 5,58 | 5,61 | 5,09 | 5,81 | 4,98 | 5,82 | 4,87 | 4,66 |
| LF | 23,74 | 25,69 | 30,03 | 26,15 | | 69,53 | 32,51 | 21,22 | 26,67 | 21,50 | 76,21 | 28,48 | 28,74 | 25,73 | 22,68 | 26,39 | 23,45 |
| LFC | 31,04 | 32,67 | 35,67 | | | 54,68 | 37,74 | | 33,77 | | 29,44 | 31,90 | 34,13 | 32,28 | | | 33,40 |
| IACC | 19,84 | 12,88 | | | | | 18,93 | | 15,46 | | 39,24 | 22,39 | | | | | |
| MEAN T30-LF | 13,03 | 13,14 | 14,45 | 14,77 | | 20,70 | 13,62 | 14,82 | 13,35 | 13,86 | 30,61 | 14,20 | 13,89 | 12,43 | 13,67 | 14,12 | 12,02 |
| MEAN T30-LFC | 15,28 | 15,58 | 17,10 | | | 24,95 | 16,63 | | 15,90 | | 30,46 | 16,41 | 16,42 | 14,91 | | | 14,69 |

| OPEN AND CLOSED CURTAINS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PARTICIPANT | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 20 | 21 |
| MEAN T30-LF | 14,89 | 14,65 | 13,53 | 15,48 | | 23,74 | 14,99 | 14,56 | 15,61 | 14,06 | | 13,74 | 13,52 | 12,80 | 14,09 | 16,96 | 12,99 |
| MEAN T30-LFC | 16,40 | 16,42 | 15,75 | | | 27,01 | 17,08 | | 17,39 | | | 15,61 | 15,70 | 14,75 | | | 14,79 |

existentes, mesmo um excelente simulador não fornecerá resultados confiáveis.

10. Desenvolvimentos recentes

Algumas linhas de pesquisa dão prosseguimento à pesquisa na área de simulação numérica. A mais importante delas diz respeito ao processamento binaural no receptor. Em outros termos, a chegada dos raios sonoros no receptor leva em conta não só sua energia e retardo — suficientes para a determinação da resposta impulsiva — mas também sua direção, necessária à determinação da resposta impulsiva binaural. Com essa informação, dois aspectos podem ser abordados: a determinação da família de correlações cruzadas interaurais, *IACC*, *IACC_E* (*E* de *Early*, precoce), *IACC_L* (*L* de *Late*, tardio) etc. e a auralização da sala.

A auralização, que consiste em simular o campo sonoro percebido por um receptor humano no interior da sala — também conhecida como realidade virtual acústica — é um tema fascinante, que tem suscitado diversas publicações [22]- [24]. O ponto crucial de qualquer processo de auralização é poder realizá-la em tempos de cálculo não astronômicos. Para tal, é necessário um modelo ao mesmo tempo simples e fidedigno para as funções de transferência associadas à cabeça (HRTF's - *Head Related Transfer Functions*).

Após desenvolver modelos eficientes para as HRTF's baseados na transformada Wavelet e na aplicação de filtros esparsos [25], estamos atualmente em uma fase de associar o módulo de auralização — que, naturalmente, utiliza como dados de entrada os resultados da simulação — de modo a integrá-lo à nova versão do programa, RAIOS 4.

Referências

- [1] Kulowski, A.: Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique, *Applied Acoustics*, 18, 1984
- [2] Dance, S. M., Shield, B. M.: The Complete Image-Source Method for the Prediction of Sound Distribution in Non-diffuse Enclosed Spaces, *J. Sound Vibr.*, 201, 1997
- [3] Farina, A.: RAMSETE-A New Pyramid Tracer for Medium and Large Scale Acoustic Problems, *Proc. of Euro-Noise*, France, 1995
- [4] Kruzins, E.; Fricke, F.: The Prediction of Sound Fields in Non-diffuse Spaces by a 'Random Walk' Approach, *J. Sound Vibr.*, 81, 1982
- [5] Lewer, T.: A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics, *Applied Acoustics*, 38(2-4), 1993
- [6] Vorländer, M.: Simulation of the Transient and Steady-state Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-tracing/Image-source Algorithm, *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1), 1989
- [7] D'Antonio, P.; Trevor, J.C.: Diffusor Application in Rooms, *Applied Acoustics*, 60, 2000
- [8] Bermond, R.; Davies, W.: Influence of Diffuse Reflections on the Playing of Musicians, *Proc. of 17th ICA*, Roma, 2001
- [9] Torres, R.; Kleiner, M.; Svensson, U.; Natsopoulos, G.: Subjective Evaluations of Scattering in Rooms, *Proc. of 17th ICA*, Roma, 2001

- [10] Vorländer, M.; Mommertz, E.: Definition and Measurement of Random-incidence Scattering Coefficients, *Applied Acoustics*, 60, 2000
- [11] Lam, Y.W.: A comparison of three diffuse reflexion modelling methods used in room acoustics computer models, *J. Acous. Soc. Am.*, Vol. 100, pp. 2181 - 2192, 1996
- [12] 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), 2000
- [13] Kleiner, M.; Gustafsson, H.; Backman, J.: Measurement of Directional Scattering Coefficients Using Near-field Acoustic Holography and Spatial Transformation of Sound Fields, *J. Audio Eng. Soc.*, 45, 1997
- [14] Farina, A.: A New Method for Measuring the Scattering Coefficient and the Diffusion Coefficient Panels, *Acta Acust. united with Acust.*, 86, 2000
- [15] Mommertz, E.: Determination of Scattering Coefficients from the Reflection Directivity of Architectural Surfaces, *Applied Acoustics*, 60, 2000
- [16] *ISO/WD 17487, Acoustics-Measurement of the Random-incidence Scattering Coefficient of Surfaces*, Intern. Stand. Organiz., 2001
- [17] *AES-4id-2001, AES Information Document for Room Acoustics and Sound Reinforcement Systems - Characterization and Measurement of Surface Scattering Uniformity*, Audio Eng. Soc., 2001.
- [18] *ISO 3382, Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Others Acoustical Parameters*, Intern. Stand. Organiz., 1997
- [19] *PTB home-page*, <http://www.ptb.de/de/org/1/14/1401/index.htm>, 2002
- [20] Araújo, M.A.N.: *Investigações sobre os parâmetros intervenientes na medição de absorção sonora em câmara reverberante*, Tese D.Sc, COPPE, UFRJ, 2002.
- [21] Nabuco, M.; Tenenbaum, R.A.; Schmitz, A.: Experimental investigation about possible sources of uncertainty for sound absorption measurements in reverberation chambers, *Proceedings of ICA 2001*, Roma, Itália, CD, Vol 2, 2001
- [22] Torres, J.C.B.; Petraglia, M.R.; Tenenbaum, R.A.: Room acoustics auralization: HRTF modeling using wavelet transforms, *Proceedings of X DINAME*, CD, pp. 151-157, Ubatuba, Sp, 2003
- [23] Torres, J.C.B.; Petraglia, M.R.; Tenenbaum, R.A.: HRTF modeling for efficient Auralization, *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, CD, 2003
- [24] Torres, J.C.B.; Petraglia, M.R.; Tenenbaum, R.A.: Low-order modeling and grouping of HRTFs for auralization using wavelet transforms, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Montreal, Canada, CD, Vol. IV, pp. 33-36, 2004
- [25] Torres, J.C.B.; Petraglia, M.R.; Tenenbaum, R.A.: An efficient wavelet based HRTF model for auralization, *Acta Acust. united with Acust.*, Vol 90(1), pp 108-120, 2004

Introdução aos difusores de Schroeder e análise comparativa com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg

Mannis, J.A.*; Manzolli, J.†

*Departamento de Música, IA/Centro de Documentação de Música Contemporânea - Unicamp, jamannis@uol.com.br

†Departamento de Música, IA/Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora - Unicamp, jonatas@nics.unicamp.br

Resumo

Este artigo estabelece uma interação entre o modelo consagrado de Schroeder e a técnica de composição de 12 sons, desenvolvida pelo compositor Schoenberg. Discute-se uma nova alternativa para construção de difusores, com o objetivo de mostrar que o emprego de técnicas alternativas, diferentes das sequências numéricas tradicionais, gera resultados com melhor desempenho. Apresentam-se novas propostas de design de difusores, a partir dos pressupostos composicionais enunciados e dos aspectos positivos da abordagem de Schroeder.

Palavras chave: acústica de salas, acústica musical, difusão de ondas sonoras

PACS no. 43.20.Fn, 43.55.Br, 43.75.St

1. Difusores de Schroeder

A reflexão com interferência de fase (*reflection phase-grating*) foi idealizada por Manfred R. Schroeder [1] [2] na década de 1970, inicialmente para produzir um espalhamento sonoro com o objetivo de solucionar o problema gerado por auditórios modernos com teto baixo cuja imagem sonora percebida pelos ouvintes é prejudicada pelas primeiras reflexões produzidas pelo teto, interferindo com as primeiras reflexões laterais, essenciais para o relevo sonoro. Instalados os difusores, as reflexões no teto que antes eram especulares tornam-se difusas e, assim, melhoram o conforto acústico do local. Inúmeras são as aplicações dos difusores de Schroeder, empregados hoje amplamente nos mais variados projetos acústicos.

A reflexão com interferência de fase produz um espalhamento equilibrado de intensidades sonoras em todas as ordens de difração, com exceção da ordem zero, correspondendo à direção especular, e pode ser produzida por uma superfície rígida dotada de cavidades com diferentes profundidades d_n .

Na reflexão, a fase da onda incidente é modificada de $2d_n 2\pi/\lambda$, sendo λ o comprimento de onda. Se as diferentes profundidades d_n são definidas por

$$d_n = \frac{1}{2} \frac{\lambda g^n}{p} \quad (1)$$

onde g é a raiz primitiva (*primitive root*) do número primo p , e g^n o menor resíduo módulo p , as ondas refletidas terão amplitudes complexas em sua frente de onda

$$a_n = e^{\frac{2\pi i g^n}{p}} \quad (2)$$

Em outras palavras, as diferenças de fase farão com que, em função da frequência, a onda se espalhe devido à interferência ocorrida.

1.1. Parâmetros de design de um difusor por reflexão com interferência de fase¹ [3]

1.1.1. Largura de banda

A largura de banda ($f_0 - f_{max}$) corresponde ao âmbito delimitado pela frequência mais baixa f_0 e a frequência mais alta f_{max} dentro do qual o difusor estará atuando. Trata-se de um parâmetro de projeto, pois efetivamente o difusor continua tendo um certo desempenho acima e abaixo desses limites. f_0 , também chamada de frequência de design do difusor, está associada a $\lambda_0 = c/f_0$, o comprimento de onda de design. Inversamente, a frequência f_{max} corresponde a λ_{min} .

1.1.2. Largura das cavidades

Para a correta atuação de um difusor de Schroeder, a onda que se propaga pelas cavidades deve ser plana. Assim, a largura das cavidades W é definida por:

$$W = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (3)$$

1.1.3. Número primo

N é um número primo de cujo módulo serão obtidos resíduos que constituirão uma sequência matemática. No projeto de um difusor de Schroeder, N especifica também o

Recebido em 12 de novembro de 2005.

Aceito em 13 de junho de 2006.

¹ *reflexion phase grating difusor*

número de cavidades compreendidas num período de profundidades de cavidades. N também está associada à eficiência do difusor, quanto mais elevado N , melhor o desempenho.

1.1.4. Tipo de seqüência matemática

Resíduos quadráticos A seqüência de resíduos quadráticos (QR) é definida por:

$$S_n \Big|_{n=0}^{N-1} = n^2_{\text{mod } N} \quad (4)$$

onde $n = 0, 1, 2, 3 \dots N - 1$ sendo N um número primo.

A operação de módulo consiste no resto da divisão do número n por N , definindo um conjunto de números inteiros tais que a soma ou a diferença de dois deles pertence também ao conjunto. Assim, todos os resultados da operação $n_{\text{mod } N}$ estão compreendidos no conjunto de inteiros entre 0 e $N - 1$.

Por exemplo, se tomarmos $N = 5$ e $n = 7$, $n_{\text{mod } N} = 7_{\text{mod } 5} = 2$, pois $7/5 = 1$ com resto 2.

Da mesma forma, $2_{\text{mod } 5} = 2$; $4_{\text{mod } 5} = 4$; $5_{\text{mod } 5} = 0$; $0_{\text{mod } 5} = 0$; $6_{\text{mod } 5} = 1$; $25_{\text{mod } 5} = 0$ e $26_{\text{mod } 5} = 1$.

A seqüência de resíduos quadráticos consiste na operação $\text{mod } N$ sobre a seqüência de números inteiros, na qual cada um deles é elevado ao quadrado.

$$n^2 \Big|_{n=0}^{N-1} = 0, 1, 4, 9 \dots (N - 1)^2 \quad (5)$$

1.1.5. Profundidades das cavidades

Especificando a largura de banda ($f_0 - f_{\text{max}}$) e a ordem máxima m_{max} para a frequência de base, já se pode inferir os parâmetros restantes: largura das cavidades W , o número primo N e a seqüência de profundidades d_n .

A largura de banda corresponde à diferença entre a frequência de base f_0 e a frequência máxima f_{max} , delimitada pela largura das cavidades W ,

$$f_{\text{max}} = \frac{c}{2W} \quad (6)$$

Considerando-se a espessura T dos separadores das cavidades temos

$$f_{\text{max}} = \frac{c}{2W + T} \quad (7)$$

As reflexões abaixo de f_0 e acima de f_{max} tendem a ser especulares.

O número de cavidades por período N e igualmente o número primo gerador da série é obtido através da expressão,

$$N = \frac{m_{\text{max}}c}{f_0(W + T)} \quad (8)$$

ou então,

$$N = \frac{2m_{\text{max}}f_{\text{max}}}{f_0} \quad (9)$$

Quanto maior m_{max} , maior é a difusão, ou seja, maior o número de lóbulos no diagrama polar de espalhamento. Para uma boa difusão em f_0 , m_{max} deve ser pelo menos igual a 2.

Por outro lado, observa-se que quanto maior for o número de cavidades por período N , mais baixa será a frequência f_0 e, por conseguinte, maior a largura de banda do difusor ($f_0 - f_{\text{max}}$).

O resultado de N obtido através de (8) ou (9) deve ser ajustado para o número primo imediatamente superior².

Tendo determinado N e definido f_0 pode-se calcular a seqüência de profundidades d_n ,

$$d_n = \frac{S_n c}{2N f_0} \quad (10)$$

sendo S_n no caso do

QR—resíduo quadrático

$$S_n = n^2_{\text{mod } N} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots N - 1 \quad (11)$$

PR2—raiz primitiva 2

$$S_n = 2^n_{\text{mod } N} \quad n = 1, 2, 3 \dots N - 1 \quad (12)$$

PR3—raiz primitiva 3

$$S_n = 3^n_{\text{mod } N} \quad n = 1, 2, 3 \dots N - 1 \quad (13)$$

2. Composição com doze notas

Schoenberg [4] formulou seu pensamento sobre a composição com doze notas em 1950, muito depois de ter escrito diversas obras com esse método. Basicamente, consiste no uso constante e exclusivo de uma série de 12 notas diferentes, na qual nenhuma delas é repetida antes de completar o total cromático. Por questões óbvias essa série não deve ser de modo algum idêntica à escala cromática (Figura 1), na qual o intervalo entre as notas da série é constante e igual a 1 (segunda menor). Ao contrário, a série deve conter alturas que formam entre si variados intervalos.

A notação musical em letras do alfabeto está apresentada na Tabela 1.

Os intervalos I estão representados em semitons e as notas musicais (alturas) em quantidades de semitons a partir da nota mais baixa (si = B). Assim, ao invés da razão entre duas frequências (f_2/f_1), o Intervalo passa a ser a

² 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37, 41, 43, 47, 53, 59, 61, 67, 71, 73, 79, 83, 89, 97, 101, 103, 107, 111, 113, etc.

Tabela 1: Notas musicais a partir do si(B)

| Notas musicais a partir do Si (B) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|-----|----|-----|----|----|-----|-----|------|----|-----|
| si | dó | dó# | ré | mib | mi | fá | fá# | sol | sol# | lá | sib |
| B | C | C# | D | Eb | E | F | F# | G | G# | A | Bb |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |

diferença entre cada nota musical $(n_2/n_1)^3$

$$I_i = a_{i+1} - a_i \quad (14)$$

Supondo uma série ordenada como apresentado na Tabela 2 temos os seguintes intervalos: $I_1 = 1 - 4 = -3$ semitons; $I_2 = 6 - 1 = 5$ semitons; $I_3 = 5 - 4 = 1$ semitom; $I_4 = 2 - 3 = -1$ semitom; etc.

Tabela 2: Série ordenada

| Série | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|-----|----|-----|-----|----|------|-----|----|
| mib | dó | fá | ré | dó# | mi | sib | sol | lá | sol# | fá# | si |
| Eb | C | F | D | C# | E | Bb | G | A | G# | F# | B |
| 4 | 1 | 6 | 3 | 2 | 5 | 11 | 8 | 10 | 9 | 7 | 12 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| (i) Ordem dos elementos | | | | | | | | | | | |

A Série A, Figura 1 exemplifica uma série com intervalos constantes e iguais a um semitom, ou seja, uma simples escala cromática.

Vejam na Figura 2 uma Série B com intervalos variados.

Comparando a série A com a série B, observa-se como a diversificação de intervalos enriquece uma série o que aumenta seu potencial musical. Na série B temos intervalos de $2^a m$ (segunda menor), 2^a (segunda maior), $5^a dim$ (quinta diminuída), e 6^a (sexta maior), ascendentes (\uparrow) e descendentes (\downarrow), que formam uma seqüência variada. Nessa seqüência, alguns termos aparecem tanto na forma ascendente quanto descendente ($2^a \downarrow$ e $2^a \uparrow$; $5^a dim$ e $5^a dim$, e outros permanecem fixos ($2^a m$ e 6^a).

A série C, Figura 3, apresenta uma variação ainda mais acentuada de intervalos sendo constituída de dois segmentos (3, -2, -5, -1, 7, 4) e (4, -9, 2, 5, 1, -7). O intervalo

³ Acusticamente um intervalo é a razão entre duas freqüências (Hz). Mas aqui estamos considerando a relação de semitons entre as notas, $semiton = \sqrt[12]{2}$, sendo a oitava dividida em 12 partes iguais, ou seja, em 12 notas cromáticas.

| (a) Alturas da Série A | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|----|---|----|---|---|----|---|----|----|----|
| B | C | C# | D | Eb | E | F | F# | G | G# | A | Bb |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| (i) Ordem dos elementos | | | | | | | | | | | |



| (i) ordem dos elementos | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| (a) alturas da Série A | | | | | | | | | | | |
| B | C | C# | D | Eb | E | F | F# | G | G# | A | Bb |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1-0=1 | 2-1=1 | 3-2=1 | 4-3=1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m | 2 ^a m |
| (l) intervalos (a _{i+1} - a _i) | | | | | | | | | | | |

Figura 1: Série A com intervalos constantes e iguais a um semitom (1): 11 notas do total cromático (de 0 (B = si) a 11 (Bb = si bemol)) Intervalos constantes e iguais a 1, ou seja intervalos de segunda menor.

| (a) Alturas da Série B | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|----|---|---|----|----|---|---|----|----|----|----|
| A | Bb | E | D | Eb | Db | G | F | F# | G# | B | C |
| 10 | 11 | 5 | 3 | 4 | 2 | 8 | 6 | 7 | 9 | 0 | 1 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| (i) Ordem dos elementos | | | | | | | | | | | |



| (i) ordem dos elementos | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|------------------|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| (a) alturas da Série B | | | | | | | | | | | |
| A | Bb | E | D | Eb | Db | G | F | F# | G# | B | C |
| 10 | 11 | 5 | 3 | 4 | 2 | 8 | 6 | 7 | 9 | 0 | 1 |
| 1 | -6 | -2 | 1 | -2 | 6 | -2 | 1 | 2 | -9 | 1 | |
| 2 ^a m | 5 ^a dim | 2 ^a | 2 ^a m | 2 ^a | 5 ^a dim | 2 ^a | 2 ^a m | 2 ^a | 6 ^a | 2 ^a m | |
| (l) intervalos | | | | | | | | | | | |

Figura 2: Série B: Série com intervalos variados

de $3^a M$ (terça maior) (4) é comum a ambos. Os intervalos de $3^a m$ (terça menor) (3) e de $6^a M$ (sexta maior) (9) são equivalentes (inversão). Chamamos atenção para o fato particular de que o sentido ascendente-descendente dos intervalos se encontra também invertido de um segmento para outro.

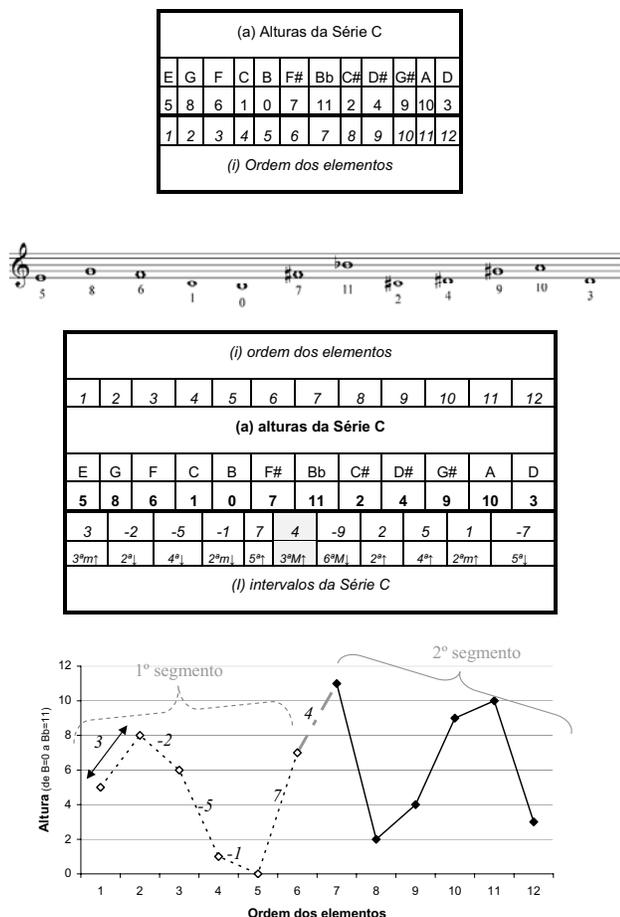


Figura 3: Série C: Representação gráfica da série de alturas. No eixo x a ordem dos elementos da série. No eixo y as alturas. Os segmentos representam os intervalos.

O gráfico 3 evidencia a simetria da distribuição das alturas percebidas pelo ouvinte. O eixo vertical é então logarítmico e representa a frequência das notas musicais.

Até aqui consideramos o âmbito da série compreendido dentro de uma oitava (0 a 11). Ampliando esse âmbito, temos, no exemplo a seguir, a série do segundo movimento da Sinfonia, op.21 de Anton Webern. Observe como o segundo segmento é geometricamente a exata retrogração⁴ do primeiro. Isso confere à série propriedades importantes para a estruturação e a unidade da composição.

Consideremos agora a série do segundo movimento da Sinfonia op.21 de Anton Webern como a Série D de alturas a partir de um sol (G) e com um âmbito de 24 semitons ao invés de 12 semitons.

O pivô A-Eb (intervalo de 5^a dim) articula dois segmentos de série perfeitamente simétricos em relação ao eixo do tempo (ordem) ou seja retrogradação. Os mesmos intervalos do primeiro segmento aparecem no segundo com

⁴ Espelhamento temporal, ou seja, as coisas ocorrem na ordem contrária do original.

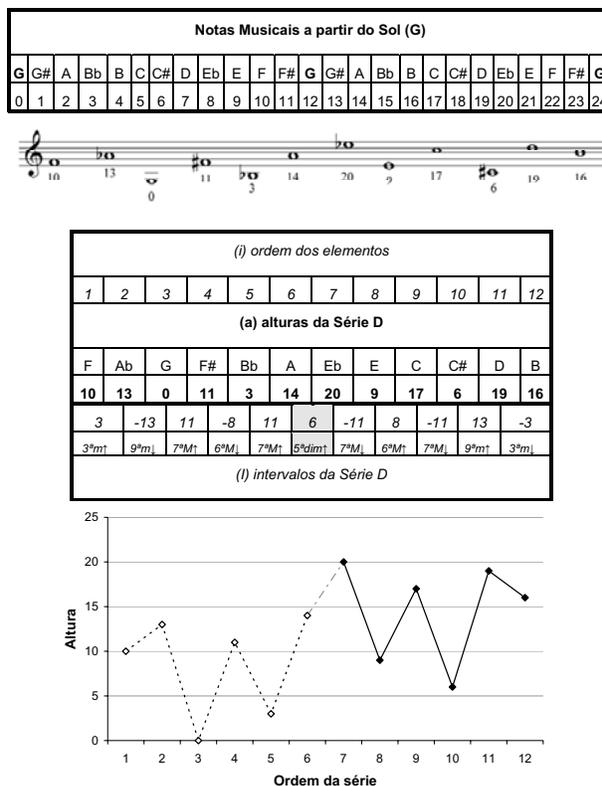


Figura 4: Representação gráfica da Série D, série do segundo movimento da Sinfonia, op.21 de Anton Webern.

sinais invertidos (segmentos em linha contínua simétricos aos segmentos em linhas pontilhadas).

2.1. Séries derivadas da série fundamental

De uma série E fundamental (O) derivam-se automaticamente três outras séries: sua inversão (I)⁵, seu retrógrado (R) e o retrógrado da inversão (RI), todas compreendidas no quadro na figura 5.

Nesse quadro geral de séries (Figura 6), as linhas da esquerda para a direita contém todas as transposições na forma original (O_i); da direita para a esquerda os retrógrados (R_i); as colunas de cima para baixo contém as inversões (I_i); e de baixo para cima os retrógrados das inversões (RI_i).

As séries (Figuras 7) foram todas adequadas a um único âmbito: B-Bb (0 a 11)

Segundo Schoenberg o emprego dessas formas espelhadas (nos domínios da frequência e do tempo) corresponde ao princípio da percepção absoluta e unitária do

⁵ Neste exemplo as inversões tem como pivot o termo $a_{17} = a_{71}$ (v. Figura 6), no caso da série geratriz original, a nota 11. Considerando a_{ij} e $i = p = cte$ e $j = q = cte$ vale a propriedade: $a_{pq} + a_{qp} = 10$ (5 + 5; 8 + 2; 6 + 4; etc.), ou seja, o enésimo termo de uma original somado ao enésimo termo de sua inversão são iguais a 10.

| Notas musicais a partir do Si (B) | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----|-----|----|----|----|----|-----|-----|------|----|-----|
| si | dó | dó# | ré | mi | mi | fa | fa# | sol | sol# | lá | sib |
| B | C | C# | D | E | E | F | F# | G | G# | A | Bb |
| 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |



Figura 5: Série E original, todas suas transposições e séries derivadas.

| (a) Alturas da Série E | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| E | G | F | C | B | F# | Bb | C# | D# | G# | A | D |
| 5 | 8 | 6 | 1 | 0 | 7 | 11 | 2 | 4 | 9 | 10 | 3 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |

(i) Ordem dos elementos

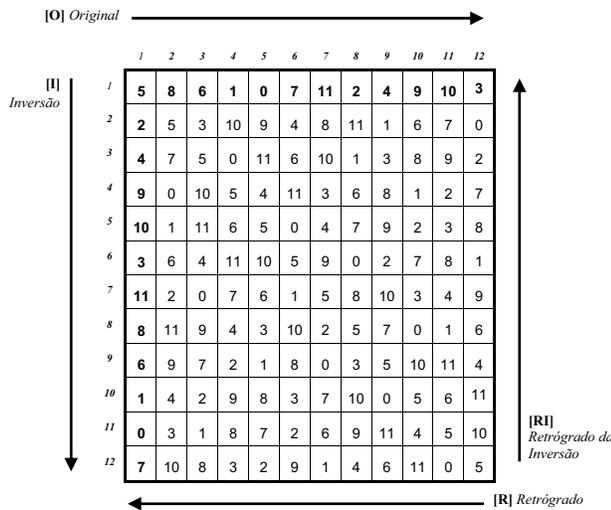


Figura 6: Quadro com todas as transposições da série geratriz nas formas original (O), retrógrado (R), inversão (I) e retrógrado da inversão (RI).

espaço musical. Para Webern [5], através dessas formas cria-se o maior número possível de relações para a 'série' e atinge-se um alto grau de coerência resultando numa grande inteligibilidade. Em outras palavras, fazer o máximo com o mínimo, obtendo dessa forma o maior grau de variação e, ao mesmo tempo, o maior grau de unidade como o célebre ditado latino (Figura 8).

2.2. Análise comparativa entre difusores de Schroeder e a organização serial na técnica de composição com doze notas de Schoenberg

As seqüências de profundidades d_n dos difusores de Schroeder QRD, PR₂D e PR₃D possuem estruturas com simetrias semelhantes às da organização das séries original (O) e suas derivadas: inversão (I), retrógrado (R) e retrógrado da inversão (RI) e igualmente contém séries,

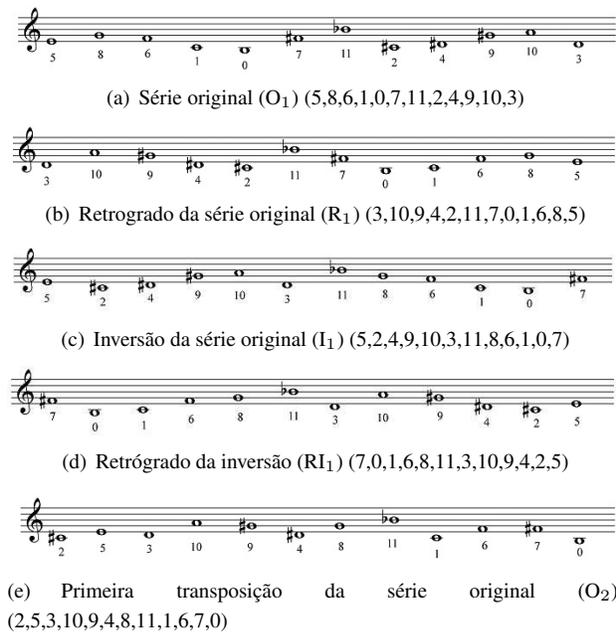


Figura 7: Séries adequadas a um único âmbito: B-Bb (0 a 11)

S A T O R
A R E P O
T E N E T
O P E R A
R O T A S

Figura 8: Ditado latino: O sementeiro Arepo mantém a obra num movimento circular, Fonte: [5]

como visto mais adiante, onde o método para composição com doze notas consiste basicamente no uso constante e exclusivo de uma série de notas diferentes, na qual nenhuma delas é repetida antes de completar o total.

Para comparar um tipo de difusor com outro, adotaremos os mesmos dados para o design de cada um. Neste caso,

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{N \cdot 2} \quad (15)$$

e com

$$\frac{\lambda_0}{2N} = cte. \quad d_n = kS_n$$

Portanto trabalharemos aqui somente com a variação do tipo da seqüência matemática (QR, PR₂, PR₃).

Para $N = 17$ geraremos as seqüências S_n para cada um dos tipos de difusores, resultando na Tabela 3.

As seqüências S_n podem ser comparadas às séries de alturas musicais.

Observa-se no QRD um eixo de simetria entre S_9 e S_{10} , sendo o segmento de S_{10} a S_{17} o retrógrado de S_1 a S_9 o que faz dessa seqüência uma série de profundidades de apenas 9 elementos {0,1,4,9,16,8,2,15,13} seguida de sua retrogradação. Em consequência dessa simetria, a seqüên-

Tabela 3: Seqüências S_n para $N = 17$ para difusores diferentes

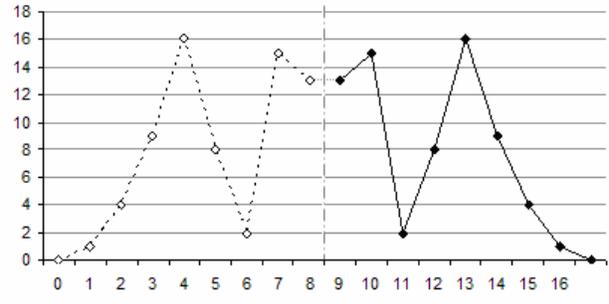
| n | QRD | PR ₂ D | PR ₃ D |
|-----|-------|-------------------|-------------------|
| | S_n | S_n | S_n |
| 0 | 0 | - | - |
| 1 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 4 | 9 |
| 3 | 9 | 8 | 10 |
| 4 | 16 | 16 | 13 |
| 5 | 8 | 15 | 5 |
| 6 | 2 | 13 | 15 |
| 7 | 15 | 9 | 11 |
| 8 | 13 | 1 | 16 |
| 9 | 13 | 2 | 14 |
| 10 | 15 | 4 | 8 |
| 11 | 2 | 8 | 7 |
| 12 | 8 | 16 | 4 |
| 13 | 16 | 15 | 12 |
| 14 | 9 | 13 | 2 |
| 15 | 4 | 9 | 6 |
| 16 | 1 | 1 | 1 |
| 17 | 0 | 2 | 3 |
| 18 | 1 | 4 | 9 |
| ... | ... | ... | ... |

cia de diferenças ($S_{n+1} - S_n$) entre S_{10} e S_{17} é retrógrada e invertida em relação a S_1 a S_8 , com pivot (0) em S_9 .

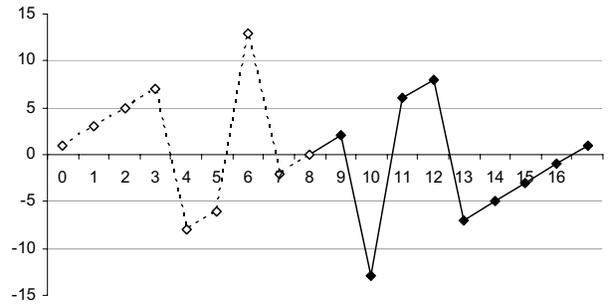
Tabela 4: QRD com $N = 17$

| n | QRD | |
|-----|-------|-----------------|
| | S_n | $S_{n+1} - S_n$ |
| 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 3 |
| 2 | 4 | 5 |
| 3 | 9 | 7 |
| 4 | 16 | -8 |
| 5 | 8 | -6 |
| 6 | 2 | 13 |
| 7 | 15 | -2 |
| 8 | 13 | 0 |
| 9 | 13 | 2 |
| 10 | 15 | -13 |
| 11 | 2 | 6 |
| 12 | 8 | 8 |
| 13 | 16 | -7 |
| 14 | 9 | -5 |
| 15 | 4 | -3 |
| 16 | 1 | -1 |
| 17 | 0 | 1 |
| 18 | 1 | 3 |
| 19 | 4 | 5 |
| ... | ... | ... |

Em PR₂D a seqüência S_1 a S_8 se repete a partir de S_9 (Figura 10 (a)), o que faz dela na verdade uma série de apenas 8 elementos {2,4,8,16,15,13,9,1}. Além disso a seqüência de S_1 a S_8 tem um eixo de simetria (veja Figura 10 (b)) sendo os termos S_5 a S_8 (linha b_1 na Figura 10 a)) a exata inversão do segmento de S_1 a S_4 (segmento



(a) Claro retrógrado (simetria de trás para frente no eixo da ordem dos elementos da série, que remete ao tempo)



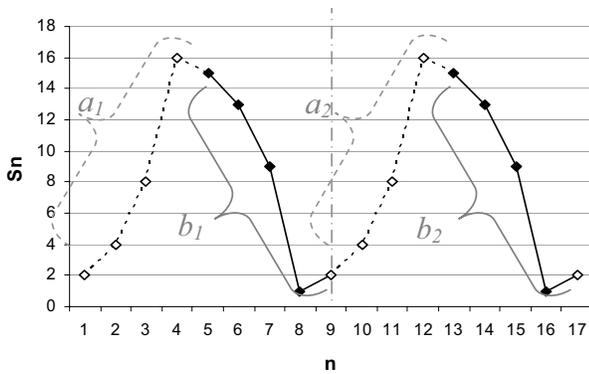
(b) Diferenças entre séries subsequentes

Figura 9: Seqüência S_n num QRD $N = 17$

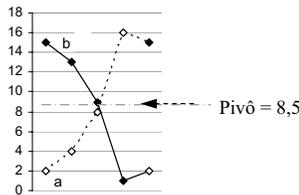
Tabela 5: PR₂D com $N = 17$

| n | PR ₂ D | |
|-----|-------------------|-----------------|
| | S_n | $S_{n+1} - S_n$ |
| 1 | 2 | 2 |
| 2 | 4 | 4 |
| 3 | 8 | 8 |
| 4 | 16 | -1 |
| 5 | 15 | -2 |
| 6 | 13 | -4 |
| 7 | 9 | -8 |
| 8 | 1 | 1 |
| 9 | 2 | 2 |
| 10 | 4 | 4 |
| 11 | 8 | 8 |
| 12 | 16 | -1 |
| 13 | 15 | -2 |
| 14 | 13 | -4 |
| 15 | 9 | -8 |
| 16 | 1 | 1 |
| 17 | 2 | 2 |
| 18 | 4 | 4 |
| ... | ... | ... |

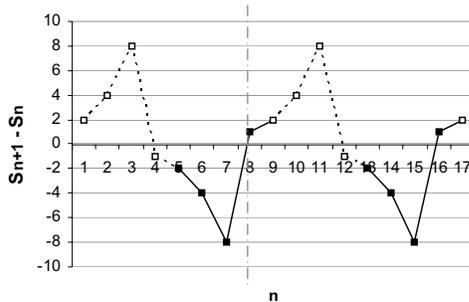
a_1 Figura 10 (b)), ou seja, $S_5 = N - S_1 = 17 - S_1$; $S_6 = 17 - S_2$; etc. A seqüência $S_{n+1} - S_n$ das diferenças entre as profundidades, consiste também em uma série de 4 elementos S_1, S_2, S_3 e S_4 seguida da sua perfeita inversão em relação ao eixo das alturas (frequências), que é S_5, S_6, S_7 e S_8 .



(a) Seqüência se repete a partir do 9º elemento



(b) Elementos a e b sobrepostos, invertidos e simétricos em relação ao eixo das alturas (freqüência) com pivô em 8,5



(c) Diferenças entre as profundidades subsequentes

Figura 10: Seqüências S_n e $S_{n+1} - S_n$ num PR_2D $N = 17$ (Linhas pontilhadas para facilitar a percepção das simetrias); (a) e (c) observa-se linhas de simetria no eixo da ordem dos elementos, a partir da qual a repetição da primeira parte é totalmente idêntica.

Em PR_3D (Tabela 6 e Figura 11) a seqüência S_1 a S_{16} é de fato uma série de 16 elementos $\{3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1\}$ na qual o segmento de S_9 a S_{16} é a exata inversão do segmento de S_1 a S_8 . Observe que a seqüência $S_{n+1} - S_n$ constitui uma série de 8 elementos que reaparece invertida a partir de S_9 . A organização dessas profundidades tem a mesma estrutura que a das séries do segundo movimento da Sinfonia, op.21 de Anton Webern (Figura 4).

A distribuição das profundidades no PR_3D possui uma complexidade maior que a distribuição nos QRD e PR_2D , que possuem séries mais redundantes. No PR_3D a série possui 16 termos, compreendendo 8 originais (a) e 8 inver-

Tabela 6: PR_3D com $N = 17$

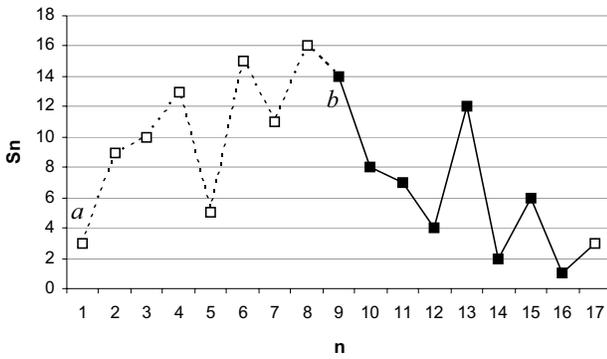
| PR ₃ D | | |
|-------------------|-------|-----------------|
| n | S_n | $S_{n+1} - S_n$ |
| 1 | 3 | 6 |
| 2 | 9 | 1 |
| 3 | 10 | 3 |
| 4 | 13 | -8 |
| 5 | 5 | 10 |
| 6 | 15 | -4 |
| 7 | 11 | 5 |
| 8 | 16 | -2 |
| 9 | 14 | -6 |
| 10 | 8 | -1 |
| 11 | 7 | -3 |
| 12 | 4 | 8 |
| 13 | 12 | -10 |
| 14 | 2 | 4 |
| 15 | 6 | -5 |
| 16 | 1 | 2 |
| 17 | 3 | 6 |

tidos (b), contra 8 do QRD , 8 termos seguido de sua retrogradação, e 8 do PR_2D , onde a seqüência de 16 consiste na simples repetição dos 8 primeiros termos. A seqüência de diferenças de profundidades mostra a variedade de articulações entre as cavidades. No PR_3D e no QRD a seqüência de diferenças contém uma série de 8 elementos, e no PR_2D uma série de apenas quatro elementos. Portanto, no PR_3D e no QRD as cavidades se articulam de 8 maneiras diferentes, enquanto no PR_2D de 4 maneiras diferentes. Sendo a inversão uma simetria mais complexa que a simples retrogradação, a variedade de diferenças de profundidades entre as cavidades num PR_3D é mais significativa que num QRD , e, quantitativamente, maior do que num PR_2D . Considerando essas relações entre as seqüências de profundidades, e a implicação que estas tem diretamente com a produção de diferenças de fase na entrada de cavidades vizinhas decorrentes do retorno da onda incidente após se refletir no fundo de cada cavidade, a riqueza de relações internas da série que regula as profundidades poderia estar diretamente associada a um desempenho melhor, uma vez que o difusor estaria impondo à onda incidente situações mais variadas de diferença de fase. Acrescente-se a isso que os efeitos parciais de profundidades de cavidades múltiplas inteiras de $1/2$ comprimento de onda, bem como o de absorção por ressonância por $1/4$ de comprimento de onda, sejam mais marcantes nos PR_2D e QRD e mais atenuados e distribuídos no PR_3D .

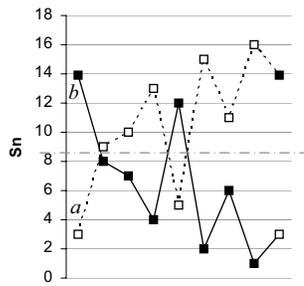
2.3. Proposta de implementação de métodos de design de difusores a partir das propriedades analisadas

2.3.1. Implementações para o design de difusores de Schroeder

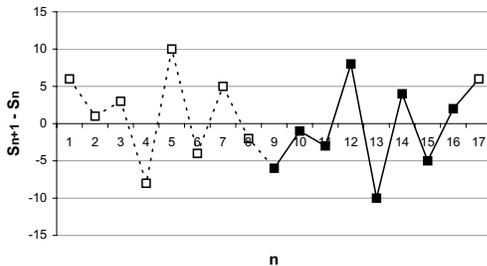
Como visto no item 2.2, uma seqüência S_n em módulo N pode ser considerada uma a série de números inteiros de



(a) Partes a e b da série



(b) Sobreposição das partes a e b da série, revelando uma simetria em relação ao eixo das alturas, portanto uma inversão



(c) Diferenças entre as profundidades subsequentes

Figura 11: Seqüências S_n e $S_{n+1} - S_n$ num PR_3D $N = 17$ (Linhas pontilhadas para facilitar a percepção das simetrias); (a) e (c) observa-se linhas de simetria no eixo da ordem dos elementos, a partir da qual a repetição da primeira parte é totalmente idêntica.

a_1 a a_{N-1} onde não há repetição de nenhum termo antes de esgotar a série inteira.

Para exemplificar, tomemos como referência a base 10 (ao invés da base 17) o que implica numa série de 9 termos e, portanto, em seqüências de 9 inteiros de 1 a 9 composta de 1 a 9, por exemplo $\{2,7,8,4,1,9,3,5,6\}$ ou $\{9,3,8,4,5,6,2,7,1\}$ ou $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$. A diferença entre as séries que acabamos de ver seria referente às relações internas entre seus próprios termos. A terceira delas é extremamente redundante, pois a diferença entre os termos é constante e igual a 1. A segunda tem estrutura

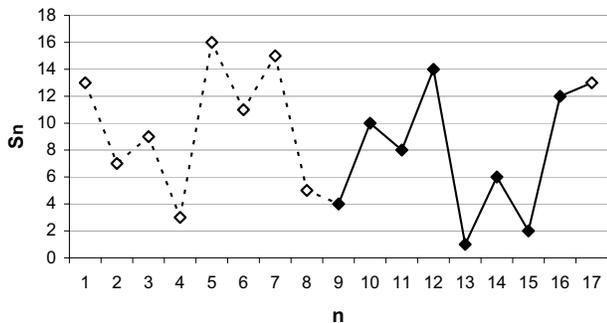
simétrica de inversão com pivô em 5 ($9 + 1 = 3 + 7 = 8 + 2 = 4 + 6 = 5 + 5 = 10$). A primeira tem maior variedade de diferenças de profundidade entre as cavidades adjacentes $S_{n+1} - S_n \{5, 1, 4, 3, 8, 6, 2, 1\}$. Justamente a técnica de composição com 12 notas baseia-se na premissa de uma série gerativa para compor uma obra. Essa série necessita ser estruturada de tal forma que, por um lado, possua ou gere um máximo de relações possíveis, e, por outro, que tenha propriedades que serão exploradas no decorrer da obra. Nesse sentido dificilmente uma série como $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ seria adotada para uma composição, o que equivaleria à uma escala cromática, como na Figura 1. Há portanto, tanto em arte como nas ciências uma necessidade estética, uma exigência de elegância na análise das coisas e dos fatos, na demonstração do que se conhece e do que se sabe, na síntese dos modelos apreendidos e nas implementações decorrentes de tudo isso.

Da mesma forma pode-se dizer que a estrutura de um PR_3D para $N = 17$ seja uma série de inteiros não repetidos de 1 a 16 com a propriedade de possuir um eixo de simetria entre o 8º e o 9º termos, sendo seu segundo segmento $\{S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}, S_{16}\}$ a inversão do primeiro $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8\}$. Assim, para os mesmos parâmetros de design de um difusor PR_3D várias séries S_n poderiam ser encadeadas o que elimina o efeito de periodicidade na medida em que estas séries forem diversificadas.

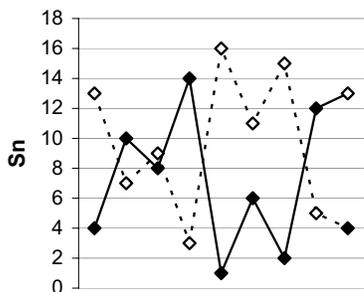
A partir de [7] pode-se inferir que as frequências críticas e de ressonância por 1/4 de comprimento de onda das profundidades das cavidades são características mais marcadas num QRD e num PR_2D do que em um PR_3D , havendo redundância superior da série num PR_2D . Isso colocaria o PR_3D como um difusor com melhor performance. Pelas propriedades intrínsecas da série do PR_3D , pode-se gerar sua série determinando os primeiros 8 elementos, sendo os demais obtidos pela inversão destes, ou seja, $a_{i+8} = 17 - a_i$. Por exemplo, dos primeiros oito termos $\{3,9,10,13,5,15,11,16\}$ pode-se deduzir os restantes $\{14,8,7,4,12,2,6,1\}$ obtendo a série total I $\{3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1\}$. (Tabela 6 e Figura 11). Para chegar a outra configuração, faz-se uma permutação dos termos $\{13,7,9,3,16,11,15,5\}$ obtendo outra série completa II $\{13,7,9,3,16,11,15,5,4,10,8,14,1,6,2,12\}$ com as mesmas propriedades.

Permutando os termos ímpares na primeira série entre os primeiros oito termos e sua inversão, temos $\{1,11,2,5,4,10,8,14,16,6,15,12,13,7,9,3\}$ e com algumas pequenas alterações chegamos à série III $\{1,11,2,10,4,5,9,14,16,6,15,7,13,12,8,3\}$ (Figura 13), uma outra série com $S_{n+1} - S_n$ todos diferentes.

Obtemos assim três séries S_n que poderiam ser encadeadas atenuando a influência da periodicidade [7].

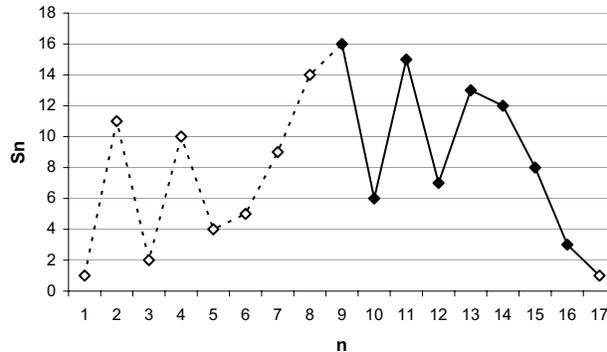


(a) Partes a e b da série

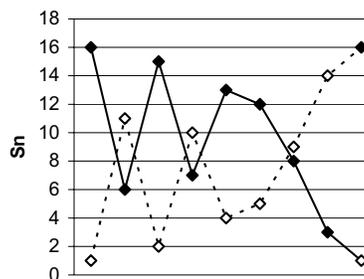


(b) Sobreposição das partes a e b da série

Figura 12: Série II (linhas pontilhadas para evidenciar a simetria da série em sua sobreposição na figura (b))



(a) Partes a e b da série



(b) Sobreposição das partes a e b da série

Figura 13: Série III (linhas pontilhadas para evidenciar a simetria da série em sua sobreposição na figura (b))

Série composta I-II-III

{3, 9, 10, 13, 5, 15, 11, 16, 14, 8, 7, 4, 12, 2, 6, 1;
13, 7, 9, 3, 16, 11, 15, 5, 4, 10, 8, 14, 1, 6, 2, 12;
1, 11, 2, 10, 4, 5, 9, 14, 16, 6, 15, 7, 13, 12, 8, 3}

A macro série I-II-III, por sua vez, poderia ser invertida [6] e o resultado seria:

(I-II-III)inv

{14, 8, 7, 4, 12, 2, 6, 1, 3, 9, 10, 13, 3, 15, 11, 16;
4, 10, 8, 14, 1, 6, 2, 12, 13, 7, 9, 3, 16, 11, 15, 5;
16, 6, 15, 7, 13, 12, 8, 3, 1, 11, 2, 10, 4, 5, 9, 14}

e encadeada com a série original: I-II-III; (I-II-III)inv:

{3, 9, 10, 13, 5, 15, 11, 16, 14, 8, 7, 4, 12, 2, 6, 1;
13, 7, 9, 3, 16, 11, 15, 5, 4, 10, 8, 14, 1, 6, 2, 12;
1, 11, 2, 5, 4, 10, 9, 14, 16, 6, 15, 12, 13, 7, 8, 3, 14,
8, 7, 4, 12, 2, 6, 1, 3, 9, 10, 13, 3, 15, 11, 16;
4, 10, 8, 14, 1, 6, 2, 12, 13, 7, 9, 3, 16, 11, 15, 5;
16, 6, 15, 7, 13, 12, 8, 3, 1, 11, 2, 10, 4, 5, 9, 14}

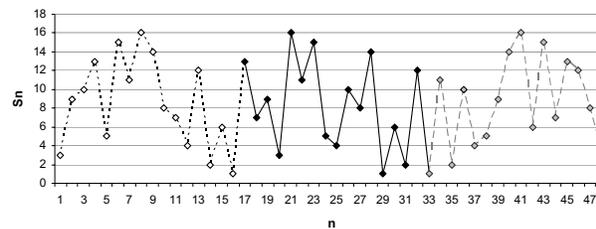


Figura 14: Séries I-II-III

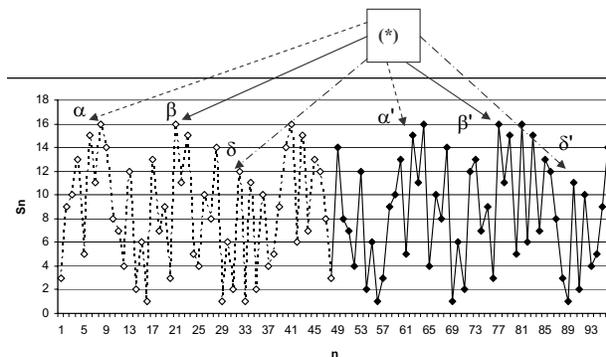


Figura 15: Série (I-II-III); (I-II-III)inv. ; (I-II-III) em linha pontilhada e (I-II-III)inv em linha contínua

À segunda metade da série (I-II-III);(I-II-III)inv, representada pela linha contínua na Figura 15 poderia ser adicionado [7] $10(\text{mod}17)$ eliminando os fragmentos retrogradados "ao pé da letra" gerados pelas duplas inversões ($\alpha, \beta, \delta, \alpha', \beta', \delta'$ em (*) na Figura 15). Na técnica de composição com doze sons, essa adição equivaleria a uma transposição da série original.

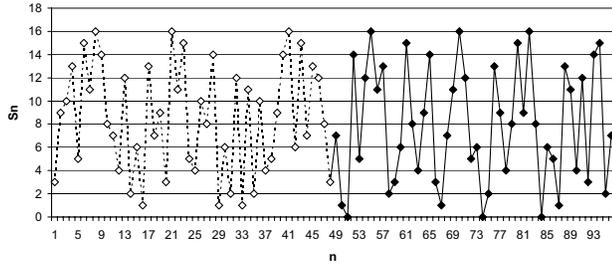


Figura 16: Série (I-II-III); $\{10+(I-II-III)\text{inv}\}(\text{mod}17)$; (I-II-III) em linha pontilhada, $\{10+(I-II-III)\text{inv}\}(\text{mod}17)$ em linha contínua

Em seguida, o todo encadeado com seu retrógrado também adicionado de $10(\text{mod}17)$. $\{I-II-III; 10+(I-II-III)\text{inv}(\text{mod}17)\}; \{10+(I-III); \{10+(I-III)\text{inv}\}(\text{mod}17)\}\text{ret}+10(\text{mod}17)$ São inúmeras as possibilidades e sempre as propriedades e a coerência das séries originais $S_{n+1} - S_n = k$ ou $S_{n+1} - S_n = 17 - k$ (diferença invertida) foram respeitadas e mantidas.

A partir da macro-série que acabamos de elaborar acima, poderíamos realizar outra série de profundidades com características de difusão distintas e diferentes parâmetros de design (f_0, N , tipo QR /PR₂/ PR₃), através de uma modulação entre as duas séries (os dois difusores) conforme esquemas propostos por ANGUS [8] [9] [10].

Se também adotarmos um f_{max} diferente para o novo difusor, teremos igualmente uma variação da largura da cavidade W , ou então W poderia ser modulado, dada uma diferença de âmbito $f_{max2} - f_{max1}$ e aplicando-se a W uma seqüência S_n tal que :

$$W_n = \frac{c}{2 \left(f_{max1} + \frac{S_n}{N} (f_{max2} - f_{max1}) \right)} \quad (16)$$

Assim para cada cavidade teremos um S_n que definirá uma porcentagem da diferença de âmbito $f_{max2} - f_{max1}$ afetando proporcionalmente o estreitamento da largura W . Este recurso seria mais facilmente aplicado a difusores unidimensionais, visto que nos bidimensionais uma mesma cavidade necessita ter a mesma largura na seqüência de sua linha como na seqüência de sua coluna.

2.3.2. Qualidades exigidas de um difusor

Um difusor acústico ideal deve ter as seguintes propriedades [11]:

- Produzir através da reflexão o espalhamento da onda incidente com distribuição direcional de intensidade uniforme;
- A energia acústica incidente deve ser refletida sem nenhuma perda de energia.

Os difusores de Schroeder cumprem bem a primeira propriedade, porém, absorvem energia:

- por causa do grande aumento de velocidade das partículas no interior e justo acima do difusor [12];
- devido ao fluxo de partículas com velocidade incrementada entre uma cavidade e outra para igualar a pressão na entrada do difusor [13];
- devido ao alto fluxo de energia na entrada das cavidades, entre aquelas que estão em ressonância e as que não estão em ressonância; e à absorção por ressonância de 1/4 de onda, sobretudo se as cavidades são estreitas [14]- [16];

Numa pequena sala, onde as reflexões ocorrem muito rapidamente devido às pequenas dimensões do local, uma absorção de 5 dB [17] a 10 dB [13] produz um caimento demasiadamente acentuado do som, interferindo assim num parâmetro fundamental para a performance musical, o preenchimento do som [18]- [20].

Portanto, devemos investigar outros tipos de difusores nos quais não ocorra absorção de energia e que possam produzir um espalhamento de energia satisfatório.

2.3.3. Exemplo de difusor com melhor desempenho que os de Schroeder

Comparando um difusor unidimensional QRD, $N = 13$, $N \cdot W = 1$ m, $d_{max} = 30$ cm (Para esses dados seria necessário $N = 17$ ($N = 2 \cdot m_{max} \cdot f_{max}/f_0$, sendo $m_{max} = 2$)), ou seja, $f_0 \sim 527$ Hz e $f_{max} \sim 2228$ Hz, $W = 7,7$ cm com um difusor composto por arcos cilíndricos com período de 1m e profundidade máxima de 20cm (Figura 17), Fujiwara [12] obteve resultados indicando que o difusor com arcos cilíndricos distribui a energia de maneira mais uniforme que o QRD em todas as frequências e, particularmente em 1KHz e 4KHz, a distribuição do difusor com arcos é muito melhor que no QRD.

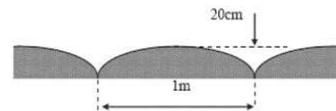


Figura 17: Difusor de arcos cilíndricos

Masuda [21] e Fujiwara comparando duas superfícies periódicas, tanto finitas quanto infinitas, ambas com período de 1m e altura máxima de 20cm, sendo uma com perfil cilíndrico e outra com perfil triangular, obtiveram

melhores resultados com o perfil cilíndrico do que com o perfil triangular. A melhoria se deu sobretudo nos lóbulos de difusão do mesmo quadrante da onda incidente. Neste quadrante o difusor triangular apresenta atenuação na distribuição de energia.

Por outro lado, por terem o perfil contínuo, os difusores cilíndricos não geram interferências de fase na reflexão, evitando portanto as turbulências que acarretam em perda de energia e, conseqüentemente, atenuações e absorções.

Conforme os resultados obtidos nos estudos que acabamos de ver até o presente, conclui-se que os difusores com perfil cilíndrico permitem de fato uma melhor qualidade de difusão.

2.3.4. Proposta de design de difusor a partir da organização serial e perfis arredondados

Considerando as qualidades exigidas de um difusor, conforme visto no item 2.3.2, a melhor performance de difusores com perfis arredondados (item 2.3.3) e as propriedades estruturais positivas das seqüências de números inteiros juntamente à organização serial pode-se imaginar uma superfície difusora irregular e arredondada com o objetivo de produzir difusão num largo âmbito de frequências, inclusive evitando os modos normais de uma pequena sala. Para isso, vamos generalizar a aplicação da organização serial, estendendo-a além de profundidades, para diversos parâmetros de irregularidades controladas de objetos como: dimensões, rotação horizontal (rotação sobre o eixo vertical; esquerda-direita), rotação vertical (rotação sobre o eixo horizontal; para cima - para baixo).

- Rotação lateral (horizontal)
 - ▷ e = painel virado à esquerda
 - ▷ d = painel virado à direita
 - ▷ Série: {e,d}
 - ▷ Seqüência: {e,d,e,d,e,d,e,d...}
- Rotação vertical
 - ▷ F = painel inclinado à frente
 - ▷ T = painel inclinado à trás
 - ▷ Série: {F,T}
 - ▷ Seqüência: {F,F,T,F, T,T,F,T, F,T,F,F, T,F,T,T, T,F,T,F, F,T,F,T, F,T,T,F, T,F,F...}
- Dimensão (largura dos painéis)
 - ▷ G = painel grande, G1 (83 cm), G2 (71 cm)
 - ▷ M = painel médio, M1 (61 cm), M2 (51 cm)
 - ▷ P = painel pequeno, P1 (43 cm), P2 (37 cm)
 - ▷ Série: {G,M,P}
 - ▷ Seqüência: {G, M, P, G, G, G, M, P, P, M, G, P, M, M, P, G, G, G, M, P, M, P, P, M, G, G, P, M, G, G, M...}
 - ▷ Série: {2,1}
 - ▷ Seqüência: {2,1,1,2,1,1,2,2,2,2,1,1,2,1,1,2,...
... 1,1,1,2,2,1,2,1,2,2,1,2,1,2,1...}
 - ▷ Série composta : {G₂, M₁, P₁, G₁, M₂, P₂}
 - ▷ Seqüência composta: {G₂, M₁, P₁, G₂,...
G₁, M₂, P₂, P₂, M₂, G₁, P₁...}

Para representar simultaneamente as rotações e variações de dimensões adota-se o seguinte critério de notação para cada elemento da série geral composta:

$$I_{Rot}^{Dim}$$

sendo:

- : (I) Inclinação (F = para frente, T = para trás)
- : (Dim) Dimensão (largura dos painéis) (P₁ = Pequeno menor, P₂ = Pequeno maior, M₁ = Médio menor, M₂ = Médio maior, G₁ = Grande menor, G₂ = Grande maior)
- : (Rot) Rotação lateral (e = esquerda, d = direita)

Reunindo todas as seqüências temos então a série geral composta:

$$F_e^{G_2} F_d^{M_1} T_e^{P_1} F_d^{G_2} T_e^{G_1} T_d^{G_1} F_e^{M_2} \dots$$

$$\dots T_d^{P_2} F_e^{P_2} T_d^{M_2} F_e^{G_1} F_d^{P_1} T_e^{M_2} F_d^{M_1}$$

$$T_e^{P_1} T_d^{G_2} T_e^{G_1} F_d^{G_1} T_e^{M_1} T_d^{P_2} F_e^{M_2} \dots$$

$$\dots T_d^{P_1} F_e^{P_2} T_d^{G_2} T_d^{G_2} T_e^{P_1} F_d^{M_2} T_e^{G_1} F_d^{G_2} F_e^{M_1}$$

2.3.5. Implementação da série geral

Na figura 18 apresenta-se a vista superior da série de inclinações de placas.

- Na primeira seqüência a série simples acima com inclinações laterais de 10°.
- Na segunda seqüência a série simples acima com inclinações laterais de 20°.
- Na última seqüência da figura 18, foram inclinados blocos inteiros de placas (estas já inclinadas previamente de 20°), um em relação a outro, para obter um efeito de difusão para comprimentos de onda maiores, que poderiam ignorar as pequenas irregularidades.

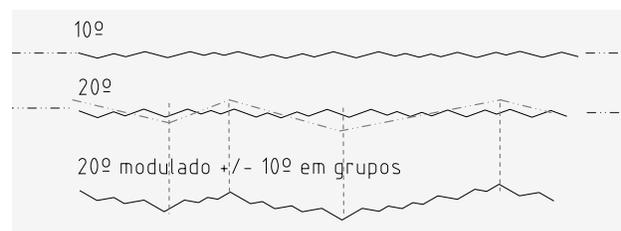


Figura 18: Vista superior do estudo das inclinações esq-dir das placas da parede de gesso duplo acartonado. Primeira fileira, inclinações de 10°. Segunda fileira, inclinações de 20°. Terceira fileira, o eixo da fileira com inclinação de 20°, foi modulado mais uma vez, dando inclinações a blocos de elementos solidários

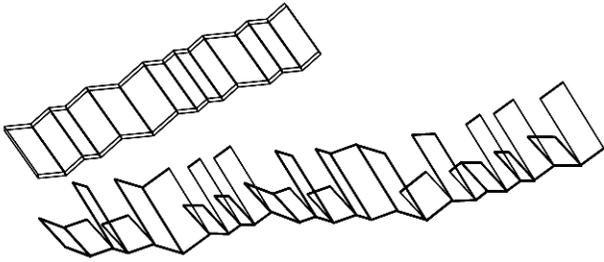


Figura 19: Na fileira de trás, placas da parede de gesso somente com inclinação lateral. Na fileira adiante, as mesmas placas porém acrescentando inclinação frente-trás.

2.3.6. Inclinações frente-trás

Ao produzir a inclinação frente-trás, abre-se um vão triangular entre as placas sucessivas. Como se trata de uma superfície de difusão, qualquer vão produziria absorção da onda incidente e, portanto, deve ser devidamente fechado, neste caso com placas triangulares, sendo o vértice sempre apontado para baixo.

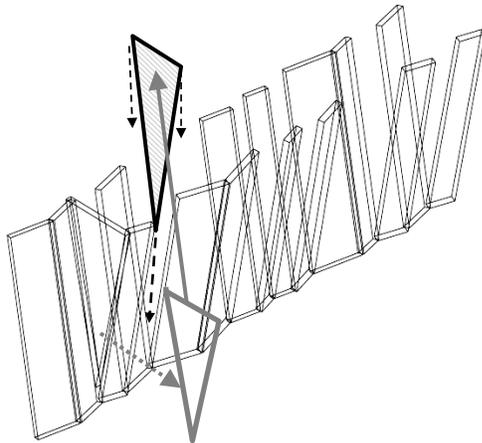


Figura 20: Placa triangular para fechamento dos vãos

Placas paralelas podem gerar modos normais derivados da distância de separação (Figura 21), com placas paralelas separadas por uma distância L e por isso devem ser evitadas. Os modos normais, a serem evitados, são dados por:

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad f_2 = 2\frac{c}{2L} \quad \dots \quad f_n = n\frac{c}{2L} \quad (17)$$

2.3.7. Procedimento para evitar paralelismo entre placas triangulares fechando vãos paralelos produzidos por inclinações frente-trás das placas principais

Ao invés da placa retangular P e suas respectivas placas de fechamento dos vãos F_e e F_d (esquerdo e direito), coloca-se um conjunto de três placas triangulares T_1 , T_2 e T_3

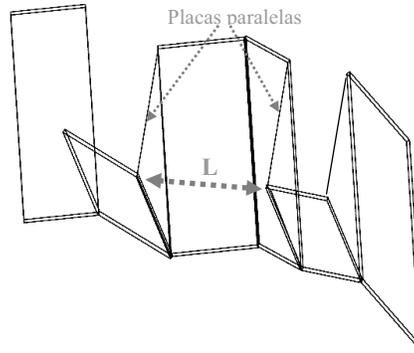


Figura 21: Placas de fechamento paralelas produzindo modos normais.

eliminando o paralelismo sem quebrar a continuidade da alternância de inclinações.

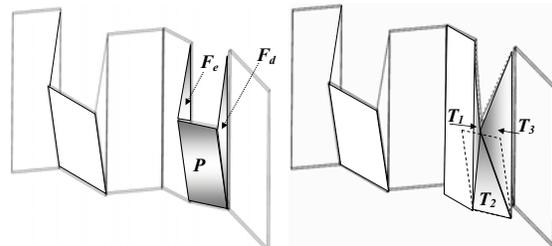


Figura 22: Conjunto de tres placas triangulares (T_1 , T_2 e T_3) substituindo a placa retangular P e suas duas placas laterais de fechamento (F_e e F_d).

Na figura 23 observam-se três locais onde a seqüência de placas foi alterada como acabamos de ver, para evitar modos normais de reflexão.

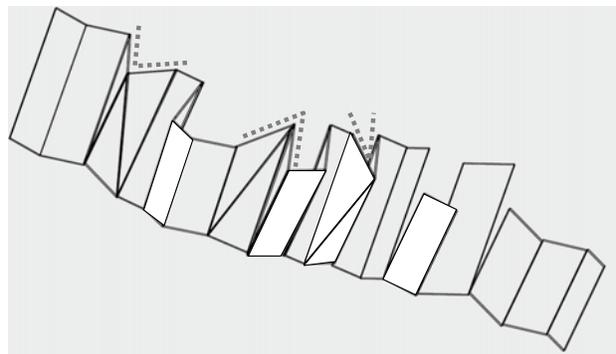


Figura 23: Parede de gesso. À esquerda placas com espaços já preenchidos por placas triangulares. À direita ainda permanecem vãos produzidos pela inclinação frente-trás.

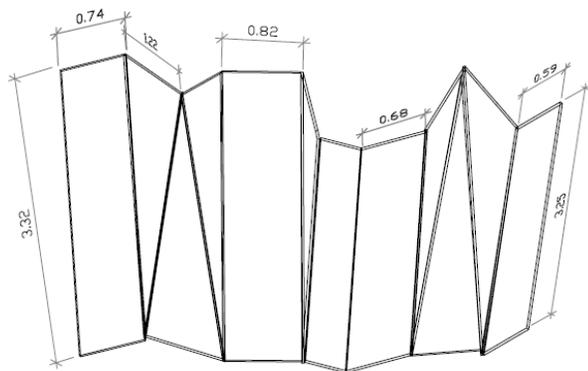


Figura 24: Algumas dimensões de uma parede de gesso concluída

Ao final, cada placa terá um perfil cilíndrico com profundidade $h = 0,2L$.

2.4. Conclusões

Superfícies como as duas últimas propostas não absorvem energia e, portanto contribuem para a manutenção do preenchimento do som na performance musical. Suas inclinações gerais evitam o paralelismo com a partição oposta e, portanto, eliminam os modos normais de uma pequena sala. Seria necessário saber como elas reagiriam na difusão de médias e altas frequências para poder validar a proposta de paredes seriais em alternativa aos difusores de Schroeder e às superfícies periódicas.

Referências

[1] Schroeder, Manfred R.: Progress in architectural acoustics and artificial reverberation: concert hall acoustics and number theory. *J. Audio Eng. Soc.*, vol.32, no.4, April 1984. p.194-198.

[2] Schroeder, Manfred R.: *Number theory in science and communication: with applications in cryptography, physics, digital information, computing, and self-similarity* 3rd ed. New York: Springer-Verlag, 1997. (Springer series in Information Sciences, vol.7) 363p. (1.ed. em alemão, Berlin : Springer, 1984)

[3] d'Antonio, P.; Konnert, J.H.: The reflection phase grating diffusor: design theory and application, *J. Audio Eng. Soc.*, vol.32, no.4, April 1984, p.228-238

[4] Schoenberg, A.: *Style and idea*, New York, Philosophical Library, 1950. vii, 224p

[5] Webern, A.: *Chemin vers la nouvelle musique*, Tradução do alemão : Anne Servant, Didier Alluard, Cyril Huvé, Paris: Jean-Claude Lattès, 1980. 170p. (Collection Musiques et musiciens, dir. Odile Cail)

[6] Angus, J.A.S.: Large area diffusers using modulated phase reflection gratings, *Convention Audio Engineering Society*, 98, 1995, Paris, Preprint 3954

[7] Cox, T., D'Antonio, P.: Schroeder diffusers: a review, *Building Acoustics*, vol.10, no.1, 2003, p.1-32

[8] Angus, J.A.S.: Using modulated phase reflection gratings to achieve specific diffusion characteristics, *Convention Audio Engineering Society*, 99, 1995, New York, Preprint 4117

[9] Angus, J.A.S.: Wideband two dimensional diffusers using orthogonal modulated sequences, *Convention Audio Engineering Society*, 103, 1997, New York, Preprint 4640

[10] Angus, J.A.S.: Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers, *Applied Acoustics*, vol.60, nº2, June 2000, p.143-165

[11] Takahashi, D.: *A design method for optimum acoustic diffusers*, in Ando, Y., Noson, D. (Ed.): Music and concert hall acoustics, p.183-190

[12] Fujiwara, K.: *Sound reflection and absorption of a QR-type Schroeder diffuser*, in Ando, Y., Noson, D. (Ed.): Music and concert hall acoustics, Cap.21, p.211-217

[13] Everest, F.A.: *Sound studio construction on a budget*, New York (EUA): McGraw-Hill, 1997, 298p

[14] Fujiwara, K.; Miyajima, T.: A study of the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser, *Acustica*, vol.81, 1995. p.370-378

[15] Wu, T.; Cox, T.J.; Lam, Y.W.: From a profiled diffuser to an optimised absorber, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.108, nº2, 2000. p.643-650

[16] Wu T., Cox T.J., Lam Y.W.: A profiled structure with improved low frequency absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.110, 2001. p.3064 – 3070

[17] Fujiwara, K.; Moriyasu, N.: A study on the absorption coefficient of a practically constructed Schroeder diffuser at normal incidence, *Proceedings Inter-noise 93. Vol.III*, p.1703 (1993)

[18] Beranek, L.L.: *Music, acoustics & architecture*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962, 585p

[19] Malafaia, S.F.; Tenenbaum, R.A.: Estudo psicoacústico dos parâmetros utilizados para caracterizar a qualidade acústica de salas de concerto, *Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, 19, 2000, Belo Horizonte, p.318-323

[20] Mannis, J.A.: Intérprete do som: Bases interdisciplinares da performance eletroacústica: Tomada e projeção do som, *Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, 19, 2000, Belo Horizonte, p.318-323 (acompanha CD-ROM com texto completo)

[21] Masuda, K.: *Sound reflection from periodical uneven surfaces*, in Ando, Y., Noson, D. (Ed.): Music and concert hall acoustics, p.191-201

Qualidade sonora: conceitos básicos ilustrados com um exemplo da área automotiva

Leite, R.P.*; Paul, S.†

*Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, ricardopennaleite@gmail.com

†Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, st.paul@emc.ufsc.br

Resumo

Você sabe como reconhecer a qualidade de um chocolate? E a de um som? Será que o som do liquidificador é apropriado para ele? Para responder a estas perguntas, algumas técnicas foram adotadas de outras áreas ou desenvolvidas pela engenharia. Neste artigo, alguns conceitos básicos de qualidade sonora são apresentados. Fala-se da impossibilidade de se medir a qualidade sonora; dos métodos de gravação; da avaliação por modelos físicos e psicoacústicos; de alguns métodos clássicos de avaliação subjetiva; de alguns métodos estatísticos e da correlação entre os resultados subjetivos e objetivos. Um trabalho realizado no LVA-UFSC é usado como exemplo ilustrativo: um estudo do ruído do sistema de ventilação de um modelo de automóvel.

Palavras chave: Qualidade sonora, sistema de ventilação, avaliação objetiva, avaliações subjetivas

PACS no. 43.20.Ye, 43.66.Lj

1. Introdução

Você sabe como reconhecer a qualidade de um chocolate? A princípio, pensa-se no paladar. Quando se compara um com outro, diz-se que “este é mais gostoso que aquele”, que “este é mais doce”. No mercado, são centenas as opções: amargo, meio-amargo, ao leite, com castanha de caju, com avelã. Em cada uma delas, não é lembrado apenas o sabor, mas também que um tipo é mais crocante, que outro derrete mais na boca, que um é mais escuro, que outro é branco. Ou seja, inicialmente se pensou no paladar, mas logo se reparou que outros sentidos também são importantes: a visão, o tato e o olfato. Um folheto de propaganda da marca suíça Lindt ensina que *gourmets* de verdade testam a qualidade do chocolate utilizando os cinco sentidos. Sim, eles também “ouvem” o chocolate! O folheto explica que se deve segurar a barra de chocolate perto de um ouvido e parti-la ao meio. O ruído resultante pode ser bem nítido, típico de um chocolate de alta qualidade, ou opaco. Muito embora a maioria dos consumidores não perceba isso conscientemente, o “ruído do chocolate”, do biscoito água e sal ou de qualquer outro produto capaz de produzir sons ajuda a identificar a marca e contribui para a percepção da sua qualidade.

Naturalmente, há outros produtos em que a associação com o ruído gerado por ele é mais forte. Só se “ouvirá” a barra de chocolate quando ela for partida ou mordida (neste caso, através das vibrações transmitidas por via óssea para os ouvidos). Já no caso de um liquidificador, sabe-se que o seu funcionamento gera necessariamente

um ruído, muitas vezes alto e desagradável, mas que também é fonte de informação: diz ao usuário se o aparelho está funcionando, em qual velocidade, se tem algum problema ou não. Há algum tempo, o ruído dos produtos era considerado uma questão de menor relevância, ele só aparecia quando estava associado a características negativas [12]. Ou seja, o liquidificador era “barulhento” e o barulho deveria ser reduzido ao mínimo possível. Mas apenas diminuir o ruído não é mais considerado suficiente: ele deve ser “desenhado” de forma a dizer ao consumidor que aquele liquidificador é “potente” e “robusto”. Tudo vai depender da imagem pensada para uma marca: o ruído pode ajudar a construir a identidade do produto [12].

Porém, para o *design* do som de um produto, é necessário saber o que os consumidores pensam sobre esse som. Para isso, as avaliações subjetivas são uma importante ferramenta. Elas consistem, basicamente, em apresentar um conjunto de sons para um grupo de pessoas, chamadas de sujeitos, e pedir que elas julguem os sons de acordo com um método pré-estabelecido. Por exemplo, após ouvir uma série de sons de liquidificadores, pode-se pedir aos sujeitos que decidam qual, entre eles, é o som que passa a maior impressão de “robustez” do aparelho. Com esse resultado, pode-se investigar quais as características físicas e/ou psicoacústicas do ruído que geram aquela impressão, e se é possível obter equações que prevejam o resultado das avaliações subjetivas a partir dessas características. Mas que características seriam essas? As mais básicas são o nível de pressão sonora (NPS), com ou sem as curvas de ponderação, o espectro de potência e o envelope do espectro. Mas essas medidas não são suficientes para caracterizar os sons. Sabe-se que dois ruídos com o mesmo valor de NPS podem soar muito diferentes. Então,

Recebido em 05 de maio 2006.

Aceito em 04 de julho de 2006.

com o avanço da psicoacústica, criaram-se modelos que são capazes de modelar sensações como a de “agudeza”, de “flutuação” e de “aspereza” de um som, entre outras. Os algoritmos que as calculam são úteis em várias aplicações, mas deve-se ter cuidado ao se utilizar os modelos, já que a sua faixa de validade é limitada [2].

Foi por volta da década de 1980 que estudos desse tipo começaram a ser feitos, principalmente na indústria automobilística, e que surgiu o termo “qualidade sonora” (*sound quality*). Na definição clássica de Blauert e Jekosch [1], “qualidade sonora é um descritor da adequação do som de um produto. Ele resulta dos julgamentos sobre a totalidade das propriedades auditivas desse som, sendo que esses julgamentos têm como referência o conjunto de características desejadas para o produto e perceptíveis para o usuário na sua real situação cognitiva, emocional [e depende também das atividades do sujeito no momento da avaliação do som do produto].” Com isso, vê-se que não se pode “medir” a qualidade sonora de um produto, já que ela é um “descritor da adequação do som” desse produto.

Assim, vê-se que o conceito de qualidade sonora engloba várias dimensões do som, como a agradabilidade, a preferência, as informações que ele passa, etc. Apenas a combinação dessas dimensões irá fornecer um indicador de qualidade sonora e de adequação do som do produto, que serão interpretados conforme a situação pessoal de cada consumidor. Ainda existe a idéia equivocada de que se pode, através do cálculo de alguns modelos psicoacústicos, se chegar a um número que indica qual a “qualidade” do som. Esse equívoco pode ser comparado com a tentativa de Spearman, no início do século passado, de criar um índice geral para a inteligência. A pessoa era submetida a um teste e o resultado seria o seu quociente de inteligência (QI). Hoje em dia existe um consenso entre os psicólogos que se pode investigar apenas algumas dimensões da inteligência, como a habilidade verbal ou a habilidade lógica. O método de Spearman estimava apenas um único fator. Da mesma forma, se pode pesquisar a “habilidade de agradar” de um som, a “habilidade de não aborrecer” ou a “habilidade de passar a informação sobre o funcionamento do produto”.

Nas próximas seções, serão abordadas as principais etapas de um projeto de qualidade sonora, que são: gravação e edição dos eventos sonoros desejados; análise auditiva por especialista; o cálculo das propriedades físicas e psicoacústicas do som; as avaliações subjetivas e a consequente análise estatística; a correlação entre as avaliações subjetivas e as propriedades do som, o que auxilia a tirar conclusões sobre o som.

1.1. Exemplo

Neste artigo, as explicações serão ilustradas com um exemplo: um estudo desenvolvido no Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina sobre o ruído do sistema de ventilação de um modelo de automóveis [14] [15]. O sistema de condiciona-

mento de ar, ventilação e aquecimento (CAVA) desse carro pode ser de três tipos diferentes: *Ar-condicionado* (com ar-condicionado e aquecimento), *Simples/Aquecimento* (sem ar-condicionado, mas com aquecimento) e *Simples* (sem ar-condicionado e sem aquecimento). Também possui quatro velocidades de ventilação e quatro saídas de ar: *Pára-brisa* (para o pára-brisa), *Frente* (para as saídas frontais do painel), *Pé* (para os pés dos passageiros), e *Pé/Pára-brisa* (para os pés e o pára-brisa simultaneamente).

2. Gravação

Como a percepção auditiva é formada predominantemente por apenas duas entradas (a pressão sonora nos tímpanos) [8], o ideal, num trabalho de qualidade sonora, é gravar os sons com dois microfones. Para isso, usa-se comumente um manequim, composto geralmente de cabeça e torso, que tem um microfone inserido no lugar de cada ouvido, conforme se pode ver na Figura 1. Isso possibilita que a gravação seja bem próxima ao que uma pessoa ouviria, se estivesse no lugar do manequim, e que a reprodução do som seja mais autêntica, o que é importante para as avaliações subjetivas. Esse sistema é chamado de *biauricular* (inglês: *binaural*).

2.1. Exemplo

O sistema de ventilação do automóvel em estudo foi gravado com um manequim. Foram gravados doze carros recém fabricados, ainda no pátio da montadora, todos do mesmo modelo. Eles estavam parados e com o motor desligado. Apenas o sistema de ventilação foi gravado — o ar-condicionado sempre permanecia desligado (no caso dos carros que possuíam este equipamento). Um roteiro de atividades foi elaborado, para garantir que o processo fosse feito sempre da mesma forma. O manequim foi posicionado no banco do motorista, conforme a Figura 1, e a sua saída digital foi ligada a um *notebook*, que utilizava o *software* dBSONIC[©] para as gravações. O *notebook* era posicionado do lado de fora do veículo, para evitar ruído de fundo gerado pelo barulho do disco rígido. Cuidados como o ajuste dos bancos, fechar todas as portas e janelas, e o ajuste do sistema de ventilação (abertura das válvulas e ajuste da direção das saídas de ar) foram tomados.

Todas as combinações de saídas de ar e velocidades de ventilação foram gravadas, resultando em dezesseis amostras sonoras por carro. Elas foram editadas para ter 5 segundos de duração, *fade in* de 60 ms e *fade out* de 80 ms.

3. Avaliação por propriedades físicas e modelos psicoacústicos

Para avaliar o som de forma objetiva, de forma a caracterizá-lo de acordo com as suas propriedades físi-



Figura 1: Exemplo de um manequim para gravação bi-auricular, durante as gravações do sistema de ventilação de um automóvel

cas e psicoacústicas, usam-se tanto ferramentas conhecidas da análise digital de sinais, como a *Discrete Fast Fourier Transformation* (DFFT), quanto algoritmos mais avançados, como a transformação de *wavelet*, ou modelos psicoacústicos. Esses modelos são conhecidos também como “métricas” psicoacústicas, porém o termo “modelo” é mais adequado, já que eles não medem a percepção do som¹, mas sim a modelam.

Existem diversos modelos psicoacústicos para as diferentes dimensões da percepção de um som, como a de agudeza, de volume, etc. A escolha da análise apropriada é uma tarefa que requer o conhecimento e o ouvido treinado de um especialista. Como ponto de partida na busca dos modelos psicoacústicos mais adequados, a DFFT é uma ferramenta bastante útil.

3.1. Modelos psicoacústicos

Os principais modelos psicoacústicos são a intensidade de flutuação, a aspereza, que modelam a percepção auditiva decorrente de modulações no sinal acústico; o *loudness*, que modela a percepção do volume sonoro; a tonalidade, que modela a capacidade que um som tem de provocar a sensação de um tom puro; e a agudeza. Esses modelos estão resumidos nesta seção. Mais detalhes podem ser encontrados no livro de Zwicker e Fastl [25].

Intensidade de flutuação Modulações de até cerca de 20 Hz do sinal sonoro conduzem a uma percepção auditiva chamada de intensidade de flutuação (*fluctuation strength*). A intensidade de flutuação apresenta valores maiores quando a frequência de modulação gira em torno de 4 Hz. O valor da intensidade de flutuação de um tom

senoidal de 1 kHz e nível de 60 dB, modulado em amplitude numa frequência de 4 Hz e fator de modulação 1, é definido como 1 vacil.

Aspereza Modulações entre 15 e 300 Hz do sinal sonoro conduzem a uma percepção auditiva de aspereza (*roughness*). A aspereza apresenta valores maiores quando a frequência de modulação gira em torno de 70 Hz. Não há um limite rigoroso entre a intensidade de flutuação e a aspereza. O valor da aspereza de um tom senoidal de 1 kHz e nível de 60 dB, modulado em amplitude numa frequência de 70 Hz e fator de modulação 1, é definido como 1 asper.

Loudness O *loudness*² correlaciona-se com o volume sonoro percebido. Três procedimentos são comumente utilizados para o seu cálculo: o proposto por S. S. Stevens baseia-se na análise por oitavas, enquanto que os propostos por K. D. Kryter, usado para a certificação de ruídos de aeronaves, e E. Zwicker, usado para todos os tipos de ruídos, como também fala e música, baseiam-se na análise por bandas de um terço de oitava [6]. A norma ISO 532, de 1975, padroniza o cálculo do *loudness* de Stevens (método A) e Zwicker (método B). O método de Zwicker encontra-se normatizado também pela DIN 45631. O *loudness* também serve como base para o cálculo de outros modelos, como a intensidade de flutuação, a agudeza e a aspereza.

O *loudness* de um tom senoidal de 1 kHz e 40 dB é definido como 1 sone. A relação entre os valores em sonos e o volume sonoro percebido é diretamente proporcional, isto é, se um som for percebido como tendo o dobro de volume em relação a outro, o seu valor em sonos também será o dobro, diferentemente das medições feitas com as curvas de ponderação.

Agudeza Os sons percebidos como estridentes ou agudos possuem no seu espectro muitos componentes de alta frequência. Para se medir esta sensação, criou-se a agudeza (*sharpness*), um modelo útil em avaliações de timbre. Quanto maior for a proporção de altas frequências no sinal, maior será a sua agudeza. O valor da agudeza pode ser relacionado com a posição do centro de gravidade do envelope espectral do som. O modelo mais usado para o cálculo da agudeza é o proposto por von Bismarck, que utiliza uma curva de ponderação que dá uma maior importância às frequências mais altas [16]. Outro modelo foi apresentado por Aures, que apresenta menor dependência do NPS e maior correlação com a impressão subjetiva.

O valor da agudeza de um ruído de banda estreita de 1 kHz, cuja largura é a de uma banda crítica³ e o nível de 60 dB, é definido como 1 acum.

¹ A percepção das dimensões do som só é medida em experimentos psicoacústicos, quando se questiona diretamente o sujeito sobre a sua percepção.

² Por falta de uma palavra em português adequada, está-se usando aqui o termo em inglês, conforme apontado por Leite [14].

³ O conceito das bandas críticas é explicado em [25].

Tonalidade A tonalidade (*tonality*) é um descritor do grau em que um som é percebido como tonal. Um som tonal é um som composto por apenas uma componente senoidal. A tonalidade pode ser avaliada pela capacidade que um som tem de provocar a sensação de um tom; pela presença de tons proeminentes; ou pelo grau de similaridade desse som com um tom puro. O som de máquinas que têm peças rotativas costuma ter componentes tonais, o que afeta a qualidade sonora desses equipamentos. Há vários métodos de se calcular a tonalidade, os principais são a razão tom-ruído (*tone-to-noise ratio*), a razão de proeminência (*prominence ratio*) e o modelo de tonalidade de Aures. Mais detalhes podem ser encontrados em Hastings et al. [9].

3.2. Exemplo

Usando-se o programa dBSONIC[©], calcularam-se o *loudness*, a aspereza, a agudeza, a razão tom-ruído e a proeminência para todos os arquivos de som.

O cálculo do *loudness* foi feito pelo método de Zwicker (método B da norma ISO 532), considerando campo difuso, com intervalos de tempo de 2 ms. O resultado é mostrado em soneGD (sone é a unidade de *loudness*, “GD” indica que se utilizou o método de Zwicker). A aspereza também foi calculada com intervalos de tempo de 2 ms, e os resultados são mostrados em cAsper⁴.

A proeminência e a razão tom-ruído foram calculadas pela norma ANSI S1.12 (1995), com resolução em frequência de 2,7 Hz e sobreposição de janelas de 50%. Não se utilizou nenhuma curva de ponderação.

A intensidade de flutuação não foi calculada, já que ela não caracteriza bem os ruídos em estudo, conforme foi demonstrado por uma pesquisa anterior [14].

4. Avaliações subjetivas

As avaliações subjetivas são importantes para determinar a resposta das pessoas a determinados sons, como elas reagem, e se os apreciam ou não [23]. Com elas, procura-se descobrir qual o julgamento que os ouvintes fazem dos sons em estudo, já que apenas a análise objetiva do sinal acústico não consegue identificar a sua qualidade e adjetivar o ruído como o fazem as pessoas [19]. Os julgamentos são feitos com base na experiência e nas referências que o sujeito tem do produto, além de julgarem apenas aquilo que é aparente para eles. Além disso, as atividades que os sujeitos estão fazendo ao utilizar o produto ou as atividades que eles acham que são típicas no uso daquele produto modificarão fortemente os seus julgamentos, já que eles normalmente têm um conhecimento prévio do produto ou da classe a que este produto pertence [1].

Ao se planejar uma avaliação subjetiva, deve-se ter em mente o objetivo geral do projeto, se é, por exemplo, melhorar um produto, documentar as suas características ou saber qual, dentre vários, os consumidores preferem. Diante disso, determinam-se os objetivos da avaliação, quais as questões devem ser respondidas por ela e, com isso, podem-se escolher as técnicas mais adequadas a usar [4]. No exemplo do sistema de ventilação, a avaliação subjetiva tinha como objetivo determinar quais parâmetros psicoacústicos são mais importantes para modelar o incômodo, ou desagradabilidade, causado pelos ruídos gerados por esse sistema.

A seguir, serão abordadas algumas das principais questões neste tipo de teste, que são: o ambiente de escuta, os sujeitos de teste, a preparação das amostras, a preparação do teste, os métodos de avaliação, os métodos de análise, a correlação entre os resultados objetivos e os subjetivos [19].

4.1. Ambiente de escuta

O ambiente de escuta é muito importante em uma avaliação subjetiva e deve ser o mais adequado possível. Os sons devem ser escutados e avaliados no ambiente onde eles normalmente ocorrem, para proporcionar o contexto apropriado. Assim, por exemplo, sons automotivos deverão ser preferencialmente avaliados no interior de um carro. Devem-se tomar precauções com o ruído de fundo, que pode vir de fontes como computadores, condicionadores de ar, lâmpadas fluorescentes, etc. Porém, não é recomendável fazer avaliações subjetivas em câmaras anecóicas ou semi-anecóicas, pois essas instalações despertam curiosidade nos sujeitos.

Se a avaliação for feita em salas normais deve se ter uma decoração o mais natural possível, com cadeiras e fones de ouvidos (se for o caso) confortáveis, iluminação moderada, etc., de forma a não provocar distrações no sujeito. A temperatura e umidade do ar na sala deve estar gradável (entre 20 e 24 °C, e a umidade relativa do ar entre 45 e 55%) [19]. Todos os parâmetros não acústicos devem ser mantidos constantes para todos os sujeitos.

Caso a avaliação seja feita com vários sujeitos ao mesmo tempo, chamado de avaliação em júri, deve-se tomar cuidado para que um sujeito não influencie o outro. Se os sons forem apresentados por meio de alto-falantes em uma sala que não seja uma câmara anecóica, o som será influenciado pela acústica da sala. Além disso, se os testes forem feitos por vários sujeitos ao mesmo tempo, eles não ouvirão exatamente o mesmo som por estarem localizados em pontos diferentes da sala. O uso de fones de ouvido evita esses problemas [19]. Entretanto, caso se deseje avaliar sons que contenham frequências muito baixas, os fones de ouvido não são suficientes, já que não se percebem essas frequências apenas pelos ouvidos, mas também pelo corpo. Deve-se então estudar o uso de um *subwoofer*.

⁴ “Asper” é a unidade desse modelo, “c” indica uma multiplicação por 10⁻² (1 Asper = 100 cAsper).

4.1.1. Exemplo

As avaliações subjetivas foram realizadas na garagem do laboratório, pois ali os sujeitos podiam se sentar no banco de motorista de um automóvel, o que os aproximava da condição real de uso do sistema de ventilação, conforme se pode ver na Figura 2. Os sons foram apresentados através de um fone de ouvido. Apesar de dificuldades com o isolamento acústico e o controle da temperatura da garagem, preferiu-se posicionar os sujeitos dentro do carro a levá-los para uma sala que nada lhes lembraria um automóvel.



Figura 2: A sala e o carro utilizados nas avaliações subjetivas

4.2. Sujeitos

A escolha, a quantidade e onde serão encontrados os sujeitos é essencial para as avaliações subjetivas. Devem-se levar em conta fatores como o segmento da população, idade, sexo, posição econômica, etc., além da experiência neste tipo de teste e a relação do sujeito com o produto que está sendo testado. Se a avaliação for conduzida por uma empresa, é importante que o sujeito seja um consumidor em potencial dos seus produtos [19]. Por exemplo, caso se esteja estudando o ruído de um secador de cabelos, é melhor se escolher mulheres, enquanto que, se o estudo for do ruído de um automóvel de luxo, é melhor se escolher homens de classe média alta e mais velhos. Também podem-se usar os empregados da empresa, que são sujeitos que tendem a ser mais críticos nas avaliações. Nesse caso é importante controlar a tendência individual de fornecer respostas socialmente desejáveis, independentemente de serem, ou não, verdades [5].

O método de avaliação, a dificuldade do teste e o treinamento necessário irão determinar o número de sujeitos a serem utilizados. Um importante ponto é definir quantos darão um resultado estatisticamente representativo. Otto et al. [19] afirmam que, baseados nas suas experiências, podem-se usar de 25 a 50 sujeitos se eles forem empregados da empresa, sendo que 10% dos resultados serão des-

considerados por desempenho insuficiente⁵. Caso se utilize consumidores, será necessário entre 75 e 100 participantes, sendo que eles apresentam um nível de variabilidade maior nas suas respostas, além de haver um não comparecimento ao teste de cerca de 20%. Em geral, um maior número de participantes é melhor, mas aí existe a limitação do tempo. Para testes mais complexos, necessita-se treinar mais os sujeitos, o que limita o seu número muitas vezes a menos de 10, aumentando também a variabilidade dos resultados [19].

O nível de treinamento dos sujeitos vai depender da complexidade do teste. Para tarefas simples, como escolher o som preferido entre dois ou classificar certos atributos sonoros, uma familiarização pode ser suficiente. Para tarefas complexas, como a estimativa de magnitude, é necessário mais treinamento. Quanto mais um sujeito for exposto à tarefa melhor será o seu desempenho [19]. Blauert e Jekosch [2] ressaltam que, para determinar o “perfil sensorial” de um produto, de forma os resultados demonstrem uma razoável objetividade, jurados treinados e com experiência são indispensáveis. Entretanto, há aspectos da percepção e do julgamento que podem ser percebidos apenas por sujeitos não treinados, já que sujeitos com experiência podem avaliar aspectos do som que são sutis demais ou podem ser tendenciosos.

4.2.1. Exemplo

A avaliação subjetiva foi aplicada em trinta e um sujeitos com média de idade de 25,1 anos e desvio padrão de 7,3 anos. Participaram trinta homens (97% do total) e uma mulher. Doze sujeitos (39%) declararam ter algum tipo de experiência em avaliações subjetivas de sons. Dezenove sujeitos (61%) disseram trabalhar com acústica. Dezesete sujeitos (55%) disseram possuir carro; dentre os que não possuem, dez (32%) disseram sempre dirigir algum carro da família. Os sujeitos eram voluntários. Infelizmente, não foi possível seguir todas as recomendações de Otto et al. [19]. Os principais problemas no conjunto de sujeitos utilizados são: maioria de homens, embora se relate que o resultado da avaliação de homens e de mulheres não é diferente [13]; a maioria trabalha com acústica; pequena quantidade de sujeitos. Como os sujeitos eram todos da classe média, eles eram potenciais consumidores do automóvel em estudo, muito embora grande parte dos sujeitos fosse composta de estudantes.

4.3. Preparação das amostras

É importante que as amostras realmente representem toda a população dos produtos. Durante os testes subjetivos,

⁵ Desempenho, aqui, não significa incapacidade de um sujeito de avaliar os sons, mas sim que, naquela avaliação específica, as suas respostas não foram coerentes.

deseja-se que o sujeito ouça o som original como se estivesse diante da fonte que o produziu, como um liquidificador, por exemplo, ou mesmo como se estivesse num teatro ouvindo a apresentação de uma orquestra. Para isso, costuma-se usar a gravação bi-auricular, empregando-se geralmente um manequim [19].

A amostra de som a ser utilizada nos testes com júri deve ter de 3 a 5 segundos de duração. Se ela for de um evento transiente, deve-se repeti-la várias vezes. Quando não se deseja avaliar o *loudness*, deve-se torná-lo igual em todas as amostras de forma que os sujeitos foquem em outras características sonoras [19].

4.3.1. Exemplo

Doze sons foram escolhidos para a avaliação subjetiva. Procurou-se utilizar sons de todos os tipos de saída de ar e velocidades de ventilação; sons dos três modelos do sistema de CAVA (*Ar-condicionado*, *Simples/Aquecimento* e *Simples*); e sons com componentes tonais⁶. Os sons também deveriam ser considerados bem diferentes pelos sujeitos, de acordo com um estudo anterior [14]. Dois desses sons foram escolhidos para serem apresentados duas vezes, ou seja, eles se repetiam durante a avaliação, para verificar a coerência das respostas dos sujeitos.

4.4. Métodos de avaliação

Apenas alguns dos métodos clássicos de avaliação subjetiva serão apresentados. Eles foram adaptados da psicofísica e são baseados em conceitos psicométricos. Cabe ressaltar que a utilidade desses métodos em projetos de qualidade sonora é limitada e requer treinamento dos sujeitos. O treinamento deve ser conduzido de forma que todos os sujeitos entendam os termos e escalas da mesma forma e os utilizem da mesma maneira.

Ordenamento (*rank order*) Nesse método, é pedido a cada sujeito que faça o ordenamento de n sons de acordo com algum critério, como preferência, desagradabilidade, etc. Aos sujeitos é dada a possibilidade de ouvirem os sons quantas vezes quiserem. Como desvantagens, podem-se citar que a dificuldade do método aumenta à medida que o número de sons aumenta, e que o método não fornece informações de magnitude, ou seja, com ele pode-se concluir que o som A é mais agradável que B, mas não o quanto é. Por isso, esse método é usado apenas em avaliações e comparações simples [19].

Comparação pareada (*paired comparison*) É o método em que dois sons são apresentados e os sujeitos devem fazer algum julgamento relativo entre eles, conforme um critério a definir. Por exemplo, pode-se pedir aos sujeitos que escolham no par o som que acham mais agradável. Pode-se também, a fim de se obter informações de magnitude, pedir para que digam o quanto preferem tal som, através de uma escala de resposta ordinal. Outro tipo de tarefa é pedir aos sujeitos que quantifiquem a similaridade entre os sons. Utiliza-se a escala por linhas (veja a Seção 4.4.1), escrevendo-se, nas extremidades, “muito diferente” ou “muito similar”. A técnica tem duas desvantagens. A primeira é que o número de pares a avaliar cresce consideravelmente com o número de sons, para n sons devem ser avaliados $n(n - 1)$ pares, o que torna a tarefa bastante cansativa. A segunda é que a forma de avaliação por comparação não é natural — no dia a dia as avaliações são feitas de forma absoluta, com uma “escala” interna, sendo que os valores dessa “escala” variam de acordo com as experiências do indivíduo e com o seu estado emocional. Por exemplo, o ruído de um automóvel será avaliado pelo motorista com base na sua “escala” interna, ele não ouvirá o ruído do carro e irá para outro logo em seguida para avaliar, como na comparação pareada.

Estimativa de magnitude (*magnitude estimation*) Os sujeitos devem atribuir um valor numérico ao atributo da amostra que estão avaliando, sem, contudo, que lhes seja dada uma escala com limites. A desvantagem é que os sujeitos tendem a usar valores muito diferentes um do outro, o que torna esse método mais difícil de ser aplicado. Exige, portanto, mais treinamento e uma maior experiência dos sujeitos. Pode-se também, por exemplo, apresentar uma amostra como referência e atribuir-lhe um valor para a característica que se quer avaliar, de modo que todos os sujeitos tenham a mesma base de apoio [19]. Outra saída é apresentar uma amostra que servirá como referência, mas pedir ao próprio sujeito que lhe atribua um valor. O sujeito é orientado a avaliar as outras amostras proporcionalmente à referência, isto é, se a próxima amostra de som aparentar ser três vezes mais barulhenta que a referência, por exemplo, então o valor dado a esta amostra para a característica “barulhento” deverá ser três vezes maior que o da referência [4]. Guski [7] ressalta que não se tem certeza se os sujeitos realmente associam os números às suas percepções ou se eles podem ser influenciados, ao menos temporariamente, pelo significado semântico dos números, por exemplo, um sujeito associar o número cem ao máximo possível de determinado estímulo, por causa da escala de porcentagens.

Diferencial semântico (*semantic differential*) O diferencial semântico, instrumento de medição desenvolvido por Osgood, Suci e Tannenbaum [18], é um conjunto de escalas com pares de adjetivos antônimos nos extremos de cada uma delas. Dessa forma, o sujeito poderá avaliar, de forma absoluta, o estímulo na escala que se encontra entre

⁶ O sistema de CAVA estudado não produzia muitos ruídos com componentes tonais. Eles apareciam, na maioria das vezes, nas velocidades de ventilação baixas dos modelos *Ar-condicionado* e *Simples/Aquecimento*.

os adjetivos apresentados. Um exemplo⁷ de um diferencial semântico é apresentado na Figura 3.

| | Extremamente | Muito | Um pouco | Nenhum | Um pouco | Muito | Extremamente | |
|-----------|--------------|-------|----------|--------|----------|-------|--------------|--------------|
| quieto | | | | | | | | barulhento |
| macio | | | | | | | | áspero |
| oscilante | | | | | | | | constante |
| agradável | | | | | | | | desagradável |

Figura 3: Exemplo de um possível questionário de diferencial semântico

4.4.1. Escalas

As escalas fazem parte de muitos instrumentos de medição, como por exemplo do diferencial semântico. Três tipos de escalas, os mais usados em avaliações subjetivas na indústria, são apresentados a seguir.

Escalas ordinais e intervalares Utilizando este tipo de escala, com valor mínimo e o máximo fixado, os sujeitos devem atribuir um valor numérico ao atributo da amostra que estão avaliando.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|

Figura 4: Uma possível escala de 5 pontos

Esta escala tem a desvantagem de os sujeitos não saberem ao certo que número associar à sua impressão, e de que pessoas diferentes usam a escala de forma diferente, isto é, para uma escala variando de 0 a 9, um sujeito pode usar valores de 3,0 a 7,0, enquanto que outro, de 6,5 a 8,5. Outro problema é que os extremos da escala comumente não são usados, o que pode levar a distorções como, num teste em que se pede para avaliar a similaridade entre dois sons, o sujeito não usar o valor máximo para sons iguais. Também raramente há proporcionalidade entre os resultados subjetivos e objetivos, o que dificulta a correlação entre eles [19]. Para se usar esse tipo de escala, deve-se antes apresentar todos os sons aos sujeitos, para que eles tenham uma idéia da faixa de variação do atributo do som que irão avaliar, e também instruí-los a usar toda a faixa disponível da escala [7].

⁷ O exemplo foi montado com base em Otto et al. [19], Lima [16] e Zhang e Vértiz [24]. Entretanto, não há estudos para a construção de um diferencial semântico em português para a avaliação de ruídos. Sabe-se que a simples tradução dos termos, de uma língua para outra, como foi feito neste exemplo, não é um procedimento adequado [20].

Também podem-se usar palavras, ao invés de números. Mas, não havendo estudos no idioma do teste sobre as escalas com palavras, é melhor se utilizar uma escala numerada em que, para cada número, se associe a expressão correspondente [7].

Escalas por linhas (também chamada de escala de Stone). Dá-se aos sujeitos o desenho de uma linha reta não numerada, como mostrado na Figura 5. Em uma extremidade poderia ser escrito “muito barulhento” e, na outra, “muito quieto”. Os sujeitos são instruídos a marcar na linha o ponto correspondente à sua impressão quando lhes for apresentado um som. Posteriormente, coloca-se uma escala sobre a linha a fim de se converter estes pontos em números. Outros pares de expressões podem ser usados, como “gosto extremamente” e “detesto extremamente”. Porém, estes pares devem ser escolhidos com cuidado. [20]

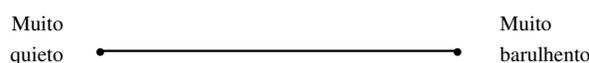


Figura 5: Exemplo de uma escala por linha⁸

4.4.2. Exemplo

A técnica do diferencial semântico foi escolhida. Como ainda não há estudos para a construção de diferenciais semânticos em português para a avaliação de ruídos [20], não foram usados os advérbios de gradação entre os pares de adjetivos, conforme recomendado por Guskı [7]. Pelo mesmo motivo, um processo simplificado teve que ser feito para a construção do diferencial semântico. Um questionário com perguntas abertas sobre o ruído do sistema de ventilação automobilística foi aplicado a treze sujeitos, sem ou com a apresentação de alguns desses ruídos. Através da análise das respostas, foram coletados adjetivos, substantivos e expressões usadas para descrever ou qualificar os sons. Assim, para a construção de um diferencial semântico, escolheram-se quatro pares, cada um deles relacionado a uma característica do som⁹: *não-incômodo/incômodo (qualidade)*, *silencioso/barulhento (volume)*, *grave/agudo (composição espectral)* e *suave/áspero (aspereza)*. Além desses, um outro par foi adicionado: *não-assobiante/assobiante*, com o objetivo de correlacioná-lo com os modelos de tonalidade (proeminência e razão tom-ruído). Este par foi escolhido após a análise de alguns pares de adjetivos alemães. O diferencial semântico montado está mostrado na Figura 6. Entre os adjetivos antônimos, foi usada uma escala com sete níveis de gradação, conforme recomendado por Osgood, Suci e Tannenbaum [18].

⁹ Estas características (qualidade, volume, composição espectral e aspereza) foram escolhidas de acordo com o bom senso.

| | | | | | | | | |
|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| não-incômodo | <input type="checkbox"/> | incômodo |
| silencioso | <input type="checkbox"/> | barulhento |
| grave | <input type="checkbox"/> | agudo |
| suave | <input type="checkbox"/> | áspero |
| não-assobiante | <input type="checkbox"/> | assobiante |

Figura 6: Diferencial semântico usado na avaliação do ruído do sistema de ventilação [14]

5. Métodos estatísticos

Quando se planeja uma avaliação subjetiva, deve-se ter em mente quais os métodos estatísticos serão usados na análise dos dados. Além da estatística descritiva (a análise da distribuição, o cálculo da média, mediana, moda, além de medidas de variabilidade, como a variância), há diversas técnicas que podem ser usadas, dependendo do instrumento de mensuração que foi utilizado e a análise que se quer fazer. Métodos bastante conhecidos são o teste-t, o ANOVA (análise de variância) e a análise fatorial. Também é bastante útil graficar os conjuntos de dados (subjetivos x subjetivos ou subjetivos x objetivos) para se investigar as relações entre eles. Esse procedimento pode revelar informações que não seriam evidentes em uma análise numérica [19].

Os métodos estatísticos chamados de paramétricos, para serem aplicados, exigem que se façam suposições acerca da distribuição de escores da população da qual se tirou a amostra. Em geral, supõe-se que esses escores obedeçam à curva normal. O teste-t e o ANOVA são exemplos clássicos desse tipo de teste. Já nos testes não-paramétricos (*nonparametric tests* ou *distribution-free tests*) essas suposições não são necessárias. Isso faz com que eles se tornem mais adaptáveis às ciências do comportamento [22].

5.1. Análise fatorial

Uma situação comum no final das análises é aquela na qual, para cada elemento de uma amostra (sujeito ou som), tem-se um grande número de variáveis. Essas variáveis podem ser, por exemplo, os escores obtidos por um indivíduo em diferentes escalas de avaliação ou os resultados dos modelos psicoacústicos aplicados aos sons.

A análise fatorial é um conjunto de técnicas estatísticas cujo objetivo é representar ou descrever um número de variáveis iniciais a partir de um menor número de variáveis hipotéticas. Isso é feito a partir de uma análise das correlações e covariâncias entre as variáveis.

Existem vários tipos de análise fatorial, os mais utilizados são o *principal components analysis (PCA)* e o *common factor analysis*.

A análise fatorial é bastante útil na análise de dados obtidos com o método do diferencial semântico.

Para esclarecimento ou aprofundamento dos métodos estatísticos, sugere-se consultar: Montgomery e Runger [17], Howell [11] ou Rummel [21].

5.2. Correlação entre os dados subjetivos e objetivos

Os testes subjetivos envolvem gasto de tempo e necessidade de se convocar e lidar com os sujeitos, por isso procura-se sempre correlacionar os resultados obtidos com alguns modelos psicoacústicos do som, de forma a se poder substituir os testes por cálculos matemáticos. Para isso, um método bastante utilizado é o da regressão linear múltipla. Nele, tem-se k regressores e n observações. O modelo que relaciona a resposta y_i aos regressores pode ser escrito conforme a Equação (1), onde y_i são as n observações (variáveis dependentes), x_{ij} são as variáveis independentes¹⁰ e β_j são os k coeficientes de regressão.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Uma forma de se medir a adequação do modelo é usando o coeficiente de determinação múltipla (R^2). Montgomery e Runger [17] mostram como calculá-lo. Tem-se que $0 \leq R^2 \leq 1$. Quanto mais perto R^2 for de 1, mais adequado é o modelo. Entretanto, Montgomery e Runger [17] advertem que “um valor grande de R^2 não implica necessariamente que o modelo de regressão seja bom. A adição de uma variável ao modelo sempre aumentará R^2 , independente da variável adicional ser ou não estatisticamente significativa.”¹¹

Outro erro comum é tratar a magnitude de cada coeficiente de regressão β como um índice da importância relativa da variável independente associada a ele. O vetor β tem apenas uma utilidade limitada como medida de importância. Isso ocorre porque os regressores, em geral, estão correlacionados entre si, e, nesse caso, os valores dos β_j mudam muito de amostra para amostra, mesmo que R^2 se mantenha constante [11].

Outro método de correlação, o das redes neurais, que é ainda pouco utilizado em qualidade sonora automotiva [19], oferece grande potencial em reconhecimento de padrões, mas tem como dificuldade a definição do vetor de entrada.

Otto et al. [19] advertem também para que se tenha sempre desconfiança dos resultados da correlação, mesmo que eles tenham sido muito bons. Deve-se lembrar que pequenas quantidades de dados podem levar a erros, já que, por

¹⁰ O fato de se chamar x_{ij} de “variáveis independentes” não significa, entretanto, que as variáveis sejam independentes entre si. Por exemplo, em qualidade sonora, normalmente se usa o *loudness*, a agudeza, a aspereza, etc., como variáveis independentes na regressão linear, mas sabe-se, por exemplo, que a aspereza é dependente do *loudness*. O que existe, na verdade, é uma confusão de termos.

¹¹ In: Montgomery e Runger [17], p. 247.

serem poucos, eles se tornam mais fáceis de se correlacionarem.

5.3. Exemplo

Após a aplicação da avaliação subjetiva, as respostas dos sujeitos foram convertidas em números: atribuiu-se zero para o meio da escala, os valores -3, -2 e -1 para os quadradinhos mais próximos dos adjetivos da esquerda, e os valores 1, 2 e 3 para os quadradinhos mais próximos dos adjetivos da direita, conforme se pode ver na Figura 7. A média e o desvio padrão das respostas, para cada som e cada par de adjetivos, foram então calculados.

| | | | | | | | | |
|--------------|----|----|----|---|---|---|---|----------|
| | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| não-incômodo | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | incômodo |

Figura 7: A pontuação atribuída para a escala do diferencial semântico

Investigou-se a correlação entre os modelos psicoacústicos e as respostas subjetivas através de gráficos e dos coeficientes de determinação (R^2), e foi aplicada a regressão linear múltipla. Não foi utilizada a análise fatorial pois o diferencial semântico tinha poucos pares de adjetivos, não se fazendo necessária uma redução das variáveis dependentes.

A Tabela 1 é uma matriz dos coeficientes de determinação entre os modelos psicoacústicos e os resultados subjetivos. Por ela, se pode ver que os pares *não-incômodo/incômodo*, *silencioso/barulhento* e *suave/áspero* se correlacionam todos muito bem com os modelos de *loudness*, *agudeza* e *aspereza*. Esses pares também se correlacionam muito bem entre eles: entre *não-incômodo/incômodo* e *silencioso/barulhento*, tem-se $R^2 = 0,99$; entre *não-incômodo/incômodo* e *suave/áspero*, tem-se $R^2 = 0,97$; e entre *silencioso/barulhento* e *suave/áspero*, tem-se $R^2 = 0,96$.

Tabela 1: Matriz dos coeficientes de determinação (R^2) entre os modelos psicoacústicos e os resultados subjetivos

| | <i>loudness</i> | <i>agudeza</i> | <i>razão tom-ruído</i> | <i>proeminência</i> | <i>aspereza</i> |
|----------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|---------------------|-----------------|
| <i>não-incômodo/incômodo</i> | 0,95 | 0,90 | 0,05 | 0,30 | 0,93 |
| <i>silencioso/barulhento</i> | 0,95 | 0,89 | 0,05 | 0,25 | 0,92 |
| <i>grave/agudo</i> | 0,48 | 0,62 | 0,02 | 0,46 | 0,51 |
| <i>suave/áspero</i> | 0,89 | 0,94 | 0,06 | 0,28 | 0,90 |
| <i>não-assobiante/assobiante</i> | 0,16 | 0,26 | 0,04 | 0,21 | 0,25 |

A Figura 8 é um gráfico que tem o *loudness* no eixo das abscissas e o par *não-incômodo/incômodo* no eixo das

ordenadas. Por ela, pode-se visualizar a correlação vista na Tabela 1: quanto maior o *loudness*, maior o incômodo.

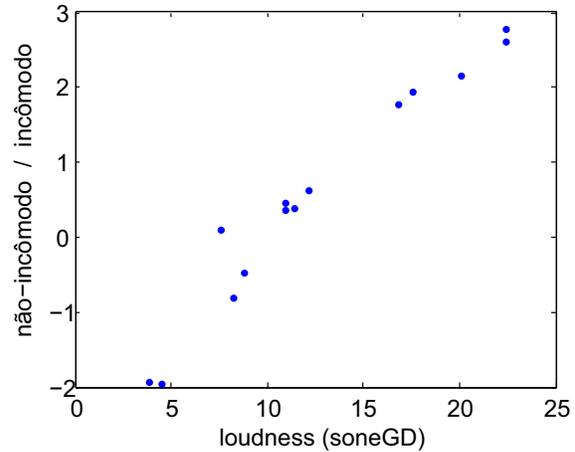


Figura 8: Relação entre as respostas do par *não-incômodo/incômodo* e o *loudness*

A regressão linear múltipla foi aplicada para se obter equações que relacionem os modelos psicoacústicos (variáveis independentes) com as respostas subjetivas dos pares de adjetivos (variáveis dependentes). O método utilizado foi o da regressão por etapas¹².

A Equação (2) é o resultado da aplicação da regressão ao par *não-incômodo/incômodo*, com $R^2 = 0,95$. A variável *inc* é a previsão da resposta subjetiva do par *não-incômodo/incômodo*.

$$inc = -2,5 + 0,24 \cdot loudness \quad (2)$$

6. Conclusões

Os conceitos básicos da qualidade sonora foram apresentados e exemplificados através de um trabalho da área automotiva. Mostrou-se que não se pode “medir” a qualidade sonora de um produto, mas sim que se pode modelar as propriedades psicoacústicas dos sons e medir a percepção das pessoas em relação aos sons. A combinação dos dados, chamados de objetivos e subjetivos, e uma análise adequada pode levar a modelos que prevejam dimensões da qualidade de um som, como, por exemplo, a desagradabilidade. No trabalho usado como exemplo, mostrou-se que o incômodo causado pelo ruído do sistema de ventilação pode ser modelado através do *loudness* (calculado pelo método de Zwicker).

¹² Sobre a regressão por etapas, consultar Montgomery e Runger [17] ou Howell [11].

7. Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Volkswagen do Brasil por ter ajudado na realização da pesquisa utilizada como exemplo; aos bolsistas de iniciação científica William D'Andrea Fonseca, Fernanda Higashi de Vasconcelos e Gustavo Tabuti, por terem ajudado nas gravações e na realização da avaliação subjetiva. Por fim, gostaríamos de agradecer às pessoas que participaram voluntariamente como sujeitos.

Referências

- [1] Blauert, J.; Jekosch, U.: Sound-Quality Evaluation — A Multi-Layered Problem. *ACUSTICA - acta acustica*, Vol. 83, p. 747-753, 1997.
- [2] Blauert, J.; Jekosch, U.: Concepts Behind Sound Quality: Some Basic Considerations. In: INTER-NOISE 2003, August 25-28, 2003, Seogwipo, Korea. *Proceedings of the 2003 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2003.
- [3] Bodden, M.: Instrumentation for Sound Quality Evaluation. *ACUSTICA - acta acustica*, Vol. 83, p. 775-783, 1997.
- [4] Civile, G.V.; Seltsam, J.: Sensory evaluation methods applied to sound quality. *Noise Control Engineering Journal*, Volume 51, Number 4, p. 262-270, 2003 July-August.
- [5] Crowne, D.P.; Marlone, D.: Social desirability and response to perceived situational demands, *J. Consult. Psicol.* 25, p. 109-115, 1961.
- [6] Fastl, H.: The Psychoacoustics of Sound-Quality Evaluation. *ACUSTICA - acta acustica*, Vol. 83, p. 754-764, 1997.
- [7] Guski, R.: Psychological Methods for Evaluating Sound Quality and Assessing Acoustic Information. *ACUSTICA - acta acustica*, Vol. 83, p. 765-774, 1997.
- [8] Hammershøi, D.; Møller, H.: Binaural Technique — Basic Methods for Recording, Synthesis, and Reproduction. In: Blauert, J. (Org.). *Communication Acoustics*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. p. 223-254.
- [9] Hastings, A., et al.: Measurement of the attributes of complex tonal components commonly found in product sound. *Noise Control Engineering Journal*, Volume 51, Number 4, p. 195-209, 2003 July-August.
- [10] Heinrichs, R.; Bodden, M.: Perceptual and instrumental description of the gear rattle phenomenon for diesel vehicles. In: SIXTH INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 5-8 July 1999, Copenhagen, Denmark, p. 3103-3112.
- [11] Howell, D.C.: *Statistical methods for psychology*. 3. ed. Belmont: Duxbury Press, 1992. 693 p.
- [12] Jekosch, U.: Assigning Meaning to Sounds — Semiotics in the Context of Product-Sound Design. In: Blauert, J. (Org.). *Communication Acoustics*. Berlin: Springer-Verlag, 2005. p. 193-221.
- [13] Kidd, G.R.; Watson, C.S.: The perceptual dimensionality of environmental sounds. *Noise Control Engineering Journal*, Volume 51, Number 4, p. 216-231, 2003 July-August.
- [14] Leite, R.P.: *Estudo do ruído do sistema de ventilação automobilística*. 2006. Tese de Mestrado — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- [15] Leite, R.P.; Paul, S.; Gerges, S.N.Y.: Investigation of the perceived sound quality of an automotive HVAC system. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2006, 21 a 23 de novembro de 2006, São Paulo. Artigo número 2006-01-2652.
- [16] Lima, F.R.: Qualidade Sonora – Conceitos Básicos. In: Gerges, S.N.Y. (Org.). *Ruídos e Vibrações Veiculares*. 1. ed. Florianópolis: NR Editora, 2005. Capítulo 6.
- [17] Montgomery, D.C.; Runger, G.C.: *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. Tradução de Verônica Calado. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003. 463 p. Título original: Applied Statistics and Probability for Engineers.
- [18] Osgood, C.E.; Suci, G.J.; Tannenbaum, P. H.: *The measurement of meaning*. 9th printing. Urbana: University of Illinois Press, 1975. 346 p.
- [19] Otto, N., et al.: Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds. *Sound and Vibration*, Vol. 35, n. 4, p. 24-47, April 2001.
- [20] Paul, S.: A First Exploration of Auditory Descriptors for Brazilian Portuguese. In: INTER-NOISE 2005, 07-10 August 2005, Rio de Janeiro, Brazil. *Proceedings of the 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, 2005. CD-ROM.
- [21] Rummel, R.J.: *Applied Factor Analysis*. Evanston: Northwestern University Press, 1970. 617p.
- [22] Siegel, S.: *Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento*. Tradução de Alfredo Alves de Farias. São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda, 1975. 350 p. Título original: Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences.
- [23] Shin, S.; Ih, J.; Jeong, H.: Statistical processing of subjective listening test data for PSQ. *Noise Control Engineering Journal*, Volume 51, Number 4, p. 232-238, 2003 July-August.
- [24] Zhang, L.; Vértiz, A.: What Really Affect Customer Perception? — A Window Regulator Sound Quality Example. In: NOISE & VIBRATION CONFERENCE & EXPOSITION, 1997, Traverse City, MI, USA. *Proceedings of the 1997 Noise and Vibration Conference*, 971909, 1997.
- [25] Zwicker, E.; Fastl, H.: *Psychoacoustics: Facts and Models*. 2nd Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 416 p.

Um Sistema de Baixo Custo para o Aluno de Acústica de Salas

Portela, M.S.*

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, portela@emc.ufsc.br

Resumo

Para o primeiro contato do aluno com os conceitos de acústica de salas, deve-se utilizar os recursos mais acessíveis. O artigo relata as etapas do desenvolvimento de um sistema de medição de parâmetros acústicos para um projeto de graduação em engenharia, que consiste em um computador equipado com placa de som estéreo, dois microfones, uma mesa de som, um amplificador de potência, uma fonte sonora omnidirecional (de acordo com a norma ISO 3382) e um *subwoofer*. O *software* utilizado foi o Aurora, como extensão (*plug-in*) do programa CoolEdit (agora Adobe Audition) utilizando sinais do tipo varredura de seno.

Palavras chave: Resposta Impulsiva, Varreduras de Seno, Fontes Sonoras Omnidirecionais, Acústica de Salas

PACS no. 43.55.Mc

1. Introdução

A comunicação através da palavra falada, a música e outras formas de som demandam características da sala de audição que raramente são estudadas de forma prática pelos alunos envolvidos em projetos acadêmicos da área de áudio, devido à falta de equipamento acessível de análise.

É comum o aluno aprender uma série de índices objetivos que podem ser considerados “mediadores” entre os dados construtivos de uma sala por um lado, e a experiência acústica do ouvinte por outro, porém sem aplicar o conhecimento em uma sala real. Dentre as técnicas para obtenção da resposta impulsiva, desde as mais tradicionais que utilizam sons de impacto até as que geram sinais específicos através de *softwares* e *hardwares* especializados, a técnica de varreduras de seno apresenta diversas vantagens [1] que serão apresentadas no item 5. Ainda, o elevado preço dos modernos sistemas de medição acústica em salas exige que sejam pesquisados sistemas de custo menor e de desempenho relativo à sua aplicação.

O projeto de pesquisa consistiu na montagem, a partir de equipamento acessível, de um sistema de medição de parâmetros acústicos. Ele foi aplicado na análise do Teatro Noel Rosa da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, o qual será beneficiado pela orientação sobre a utilização dos recursos arquitetônicos/técnicos, sendo capaz de oferecer uma melhor qualidade acústica aos artistas e ao público [2].

2. Metodologia

O desempenho desejado requer que o sistema tenha como base de operação um computador equipado com uma placa de som estéreo de pelo menos 16-bits. O sistema deverá permitir a obtenção das respostas impulsivas em dois canais, para o cálculo dos parâmetros objetivos que consideram as diferenças entre os dois ouvidos. Para tal, serão utilizados dois microfones capacitivos e as suas respectivas fontes de energia.

A ISO 3382 [3], norma de medição dos parâmetros de acústica de salas, recomenda o uso de uma fonte sonora omnidirecional. A geometria escolhida foi a do dodecaedro regular, tendo como referência os tradicionais fabricantes de equipamentos para acústica, que utilizam esta geometria e conseguem gerar campos sonoros classificados como omnidirecionais. Os alto-falantes serão especificados para que, entre outras características, tenham potência suficiente para excitar a sala e possuam resposta plana na faixa de frequências de 90Hz a 10kHz. Para uma melhor resposta em baixas frequências (abaixo de 90Hz), será utilizado, em conjunto com os alto-falantes do dodecaedro, um *subwoofer* (alto-falante de graves) posicionado no chão, embaixo da fonte omnidirecional que estará montada em um tripé.

O *software* utilizado pelo sistema de medição para obtenção e processamento da resposta impulsiva foi o Aurora [4], como extensão (*plug-in*) do programa CoolEdit (agora Adobe Audition [5], custando aproximadamente US\$ 250,00), na forma de módulos que permitiram a medição da resposta impulsiva com sinais do tipo varredura de seno e o cálculo dos índices objetivos de qualidade acústica de salas. Ainda assim, por se tratarem de programas *shareware*, os *plug-ins* não registrados funcionam sem qualquer limitação e não expiram. Porém,

Recebido em 03 de dezembro de 2005.

Aceito em 28 de junho de 2006.

* atualmente no Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

com uma chance de 1:4, pode ocorrer de a plataforma ter que ser reiniciada. Contudo, este problema termina após se inserir o código de inscrição, que pode ser adquirido (cerca de US\$ 200,00) através do *website*.

3. Sistema de medição

A Norma ISO 3382 aconselha que, para medições acústicas confiáveis, a fonte sonora seja o mais próximo possível do que se define como omnidirecional. Esta deve também produzir um nível de pressão sonora suficiente para prover curvas de decaimento com a máxima faixa dinâmica sem a contaminação do ruído de fundo.

Foi então projetado um grupamento de 12 alto-falantes em uma configuração dodecaédrica, para radiar som uniformemente com uma distribuição esférica (isotrópica). A fonte deve ter o menor tamanho possível para que ela se aproxime do modelo de uma fonte pontual, quando comparada ao volume da sala.

Para otimizar o projeto geométrico das dimensões ideais para a caixa acústica e todos os seus detalhes, evitando a inconveniência de tentativas e erros, foi usado um *software* de simulação gráfica em 3D [6], para fazer o modelo do poliedro regular de doze faces. Todos os doze alto-falantes foram conectados em uma rede série-paralela para assegurar uma operação em fase e uma impedância compatível com um amplificador de alta potência (em torno de 300 W RMS por canal).

3.1. Especificações técnicas da fonte sonora

A fonte inteira pesa 8 kg (sem o tripé) e é provida de uma alça de transporte removível que não interfere no campo sonoro durante as medições. Foi escolhido um alto-falante de 4 polegadas do modelo CN4U, da Bravox, que garante uma resposta em frequência mais ou menos plana na faixa de 80 Hz a 15 kHz. A fonte final tem como característica principal uma impedância nominal de 5,3 Ohms, a potência RMS de 300 W e o conector do tipo *Mono Phone Plug* (P10). Sua resposta em frequência será abordada a seguir.



Figura 1: Dodecaedro omnidirecional

A Figura 2 fornece a curva de resposta em frequência medida para o dodecaedro em câmara de potência (reverberante). Este espectro foi medido através de um ensaio em câmara de potência (câmara reverberante do INMETRO-RJ), cujo procedimento consiste em obter a distribuição da potência da fonte sonora por faixa de frequência. Para a obtenção do resultado final foi feita uma média dos resultados da combinação de três posições de fonte com quatro posições de microfone, descontando-se o espectro de resposta da câmara reverberante, previamente conhecido.

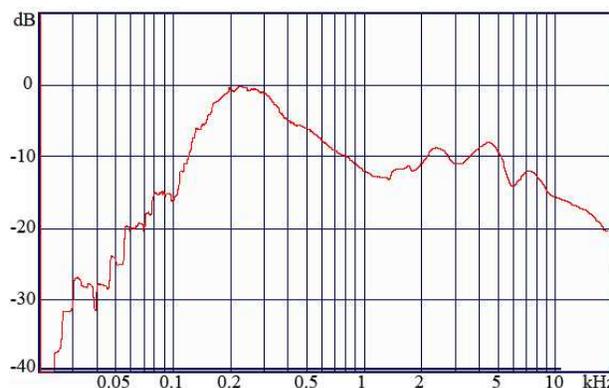


Figura 2: Resposta em frequência de potência da fonte sonora

Todos os equipamentos da cadeia de medição provocam alguma influência na estimativa da resposta impulsiva do ambiente. Essas influências devem ser anuladas, ou pelo menos atenuadas, para que a resposta impulsiva calculada retrate a realidade da sala. Nesse caso, o sinal de excitação deve ser tratado para compensar as imperfeições das respostas dos equipamentos, de forma a não prejudicar a medição. Para obter a curva de compensação deve-se inverter o espectro de potência, aplicando filtros nos sinais. Os filtros são necessários para evitar que os alto-falantes trabalhem fora da faixa ideal, onde possuem baixo rendimento e geram distorções. Como o ruído de fundo em qualquer sala tende a aumentar em baixas frequências, é também aplicada ao alto-falante uma pré-ênfase para as baixas frequências, independente da equalização.

3.2. Equipamento auxiliar

A cadeia de medição contou com equipamentos que foram sendo adquiridos dentro de um controle custo-benefício que permitisse um sistema de custo razoável, porém eficiente. Os equipamentos utilizados foram: mesa de som com pré-amplificador [EuroRack UB802 da Behringer, 8 entradas (2 dessas com alimentação *Phantom*) / 2 saídas]; dois microfones condensadores de eletreto [Superlux ECO-H6A, Padrão Polar: Cardióide, Resposta em Frequência: 40~ 18000 Hz, Alimentação: *Phantom* 36-52V];

um amplificador de potência [200 W RMS]; um *sub-woofer* ativo [Pioneer, 150W RMS, 45~120Hz]; computador [Sempron 2200 MHz com placa de áudio ADI1980 *On-Board* na ASUS A7V8X-X]. O total gasto em equipamento (incluindo os alto-falantes) ficou em torno de R\$ 2.740,00. Deve-se levar em conta que todas as partes do sistema podem ser utilizadas em várias outras aplicações.

4. Discussão da análise no teatro

Foram utilizadas duas posições de fonte sonora no palco e, para cada uma delas, seis posições de microfones foram distribuídas, de forma a representar todas as possíveis variações dos parâmetros acústicos. Com isso, foram feitas 12 medições. As médias foram realizadas a partir dos valores pontuais referentes aos dados de medição de cada assento escolhido da platéia, e representadas por gráficos. Dessa forma, tornou-se mais fácil a análise da sala como um todo, dentro de uma visão mais subjetiva. Foram avaliados: Tempo de reverberação (T_{20} e T_{30}), EDT (Tempo de Decaimento Inicial), Clareza (C_{50} e C_{80}), Tempo Central (CT), Fração Lateral (LF) e STI (Índice de Transmissão da Fala).

Em geral, os dados se mostraram consistentes, permitindo identificar uma deficiência no tempo de reverberação para altas frequências, que prejudica a qualidade dos espetáculos musicais, embora isto seja positivo para a voz falada. A necessidade da dispersão uniforme do som foi evidenciada principalmente pelo desequilíbrio no balanço de frequências, pelo fator Clareza e pela Fração Lateral medidos para a sala. O sentimento de “intimidade” ou “presença”, vital para a apreciação de espetáculos em uma sala, foi confirmado pelo pequeno atraso entre o som direto e as reflexões. Essa característica é resultado do tratamento acústico já consolidado desde a concepção do Teatro Noel Rosa.

5. Conclusões

É importante ressaltar que a proposta do sistema é permitir que alunos tenham um primeiro contato com o aspecto prático da medição acústica de salas. Sendo assim, limitações nos equipamentos presentes da cadeia de medição, como a direcionalidade dos microfones ou a qualidade da placa de som inseriram uma incerteza nos dados finais dentro de uma margem aceitável para o que se propõem.

As varreduras de seno (*swept sines*) mostraram ser sinais de excitação muito eficientes para medições acústicas, permitindo uma maior faixa dinâmica (relação sinal-ruído) no menor tempo de medição, resistência à distorção harmônica e a variâncias no tempo.

O desempenho da fonte sonora omnidirecional construída foi bastante satisfatório, sendo capaz de excitar a sala com o sinal de varredura apropriado, obtendo uma faixa dinâmica suficiente para extrair as curvas desejadas.

Referências

- [1] Müller, S.; Massarani, P.: Transfer-Function Measurement with Sweeps, *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 49, 2001, p. 443-471
- [2] Portela, M.S.: *Otimização dos Parâmetros Acústicos do Teatro Noel Rosa Baseada na Resposta Impulsiva*, Projeto de Graduação, UERJ/FEN, 2005
- [3] ISO 3382: *Acoustics — Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997
- [4] Aurora homepage, <http://www.ramsete.com/aurora/home.htm>
- [5] Adobe homepage, <http://www.adobe.com/products/audition/main.html>
- [6] Sketchup homepage, <http://www.sketchup.com>

Prévia de trabalho: Avaliação de métodos de medição da função de transferência de fones de ouvido tipo circum-auricular

Thiago R.L. Zmijevski, William D. Fonseca, Yuri A.R. Silva

A necessidade da reprodução biauricular para a avaliação da qualidade sonora de produtos ou para a avaliação de parâmetros subjetivos de salas exige cada vez mais o conhecimento detalhado da sua cadeia de gravação e reprodução. Além disso, o advento da realidade virtual aumenta o interesse no desenvolvimento dessa tecnologia, que ainda hoje se mostra adequada para a reprodução próxima da experiência auditiva [1].

O termo técnica biauricular é utilizado para denominar métodos de gravação, síntese reprodução e análise sonora onde o sinal acústico de interesse é o que chega à membrana timpânica do ouvinte. Se a gravação obtida dentro do ouvido for reproduzida com exatidão nesse ponto, o estímulo auditivo será julgado autêntico pelo ouvinte, incluindo aspectos espaciais e de timbre [2]. A reprodução é geralmente feita por fones de ouvido, já que eles oferecem a completa separação dos canais e, algumas vezes, o isolamento acústico do ambiente. No entanto, a exata reprodução do estímulo acústico requer a correção da função de transferência do fone de ouvido em questão.

O processo de caracterização da resposta de fones é realizado em duas etapas, que consistem na gravação de um campo sonoro de referência e na posterior reprodução do sinal através do fone de ouvido, segundo descrito por Møller [3].

Na Figura 1 (a) são mostradas as FRFs obtidas com 14 sujeitos, utilizando pequenos microfones inseridos no canal auricular. É importante ressaltar não só as diferenças

encontradas entre as magnitudes em altas frequências, mas também em relação à localização dos picos e vales. Outro método de avaliação, comumente utilizado, emprega um torso artificial para representar as pessoas, fornecendo resultados com maior repetibilidade.

Para exemplificar a carência das informações fornecidas pelos fabricantes, comparam-se na Figura 2 uma curva em bandas de terço de oitava com uma resposta discretizada a cada 64 Hz, ambas obtidas através de um torso. Percebe-se que o resultado em bandas de terço de oitava falha em delinear as nuances da FRF, não sendo propício para a construção de um filtro de equalização para a reprodução biauricular.

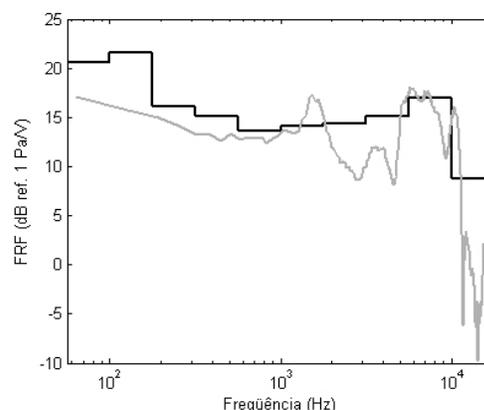


Figura 2: Comparação entre a resposta apresentada em bandas de terço de oitava e em banda estreita.

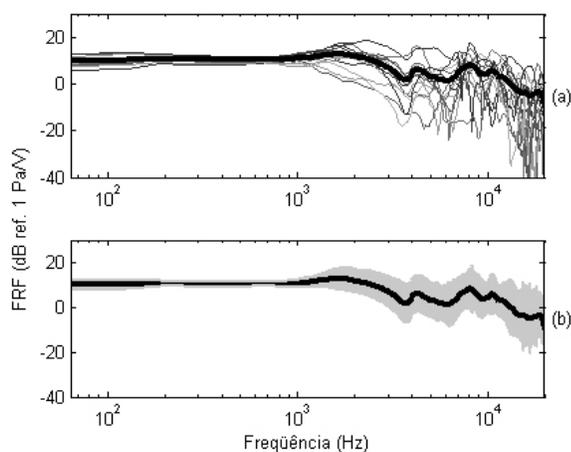


Figura 1: (a) resposta de um fone Sennheiser HD580 avaliada em 14 sujeitos; (b) a linha de maior espessura representa a média e a região sombreada compreende dois desvios padrões.

A versão completa deste artigo será publicada no V Congresso Ibero-Americano da Acústica. Para mais informações sobre diferentes métodos de avaliação da função de transferência de fones de ouvido, consultar [4].

Referências

- [1] Blauert, J.: *Communication Acoustics*, Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [2] Kurlkarni, A.; Colburn, H.S.: Variability in the characterization of the headphone transfer function, *Journal of the Acoustical Society of America*, 107, p. 1071-1074, 2000
- [3] Møller, H.; Hammershoi, D.; Jensen, C.B.; Sorensen, M.F.: Transfer characteristics of headphones measured in human ears, *Journal of the Audio Engineering Society*, 43, p. 203-217, 1995
- [4] Fonseca, W.D.; Zmijevski, T.R.L.; Silva, Y.A.R.; Geroges, S.N.Y.: Avaliação de métodos de medição da função de transferência de fones de ouvido tipo circum-auricular, *Proc. V Congresso Ibero-Americano de Acústica*, Santiago do Chile, Artigo A036, 2006

Congressos

INTERSPEECH 2006 - International Conference on Spoken Language Processing

17 – 21 September, 2006, Pittsburgh, EUA
www.interspeech2006.org

Sixth International Symposium on Active Noise and Vibration Control (ACTIVE2006)

18-20 September, 2006, Adelaide, Australia
www.active2006.com

ISMA conference on Noise and Vibration Engineering

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

tecniaústica - 37º Congresso Nacional de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica y EAA Simposium Europeo de Hidroacústica

18-20 Octubre 2006, Gandía, Valencia, España
www.ia.csic.es/Sea/tecniaacustica_06.htm

V Congreso Iberoamericano de Acústica

25-28 Octubre 2006, Santiago de Chile, Chile
www.fia2006.cl

1º Simpósio Brasileiro de Acústica de Salas, Edificações e Escolas - SIBRASEE 21º Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica

22 – 24 Novembro de 2006, São Paulo, SP, Brasil

Durante o encontro da Sobrac realizaremos nossa Assembléia Geral anual, quando deverão ser discutidos e submetidos à apreciação dos participantes algumas ações que estão sendo adotadas pela nova diretoria no sentido de implementar as propostas apresentadas durante o último processo eleitoral da Sobrac.

Em breve, quando a nova página da Sobrac na internet estiver em funcionamento todas essas informações estarão disponíveis eletronicamente aos interessados.

Público Alvo

Especialistas em acústica e vibrações nas áreas de

- Fonoaudiologia
- Engenharia
- Arquitetura
- Física
- Medicina
- Sociologia
- Educação
- Higiene e Segurança no Trabalho

Programa Preliminar

Conferências

- Avaliação acústica de teatros
- Avaliação acústica de elementos de edificações
- A Voz do Professor

Mesas Redondas

- Qualidade acústica de salas de aula
- Ruído e vibrações em ambientes de trabalho

Sessão de posters

- Acústica de salas de aula
- Acústica de salas de teatros
- Predição acústica em salas
- Inteligibilidade da palavra
- Acústica de materiais
- Acústica de edificações
- Ruído industrial
- Ruído em áreas habitadas
- Ruído em ambientes de trabalho
- Fontes sonoras
- Acústica musical
- Qualidade sonora e NVH
- Acústica computacional
- Processamento de sinais
- Avaliação Audiológica
- Emissões Otoacústicas
- Diagnóstico em Audiologia
- Prevenção de Perdas Auditivas
- Seleção e Adaptação de Dispositivos Eletrônicos
- Processamento Auditivo
- Saúde do Trabalhador
- Vibrações no corpo humano
- Vibrações e ruído de baixa frequência
- Medições de vibrações
- Manutenção preditiva de máquinas
- Controle de ruído em máquinas

Valores das inscrições

| | até 30/Jul (4 parcelas) | até 30/Ago (3 parcelas) | até 30/Set (2 parcelas) | até 30/Out (à vista) | após 30/Out (à vista) |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Não sócios SOBRAC | 61,00 | 81,50 | 123,- | 247,- | 250,- |
| Sócios SOBRAC | 36,50 | 49,- | 74,- | 148,50 | 150,- |
| Estudantes não associados | 24,40 | 32,70 | 49,30 | 99,00 | 100,- |
| Estudantes associados | 14,60 | 19,60 | 29,60 | 59,40 | 60,- |

Aqueles que quiserem se associar à Sobrac para usufruir do desconto no valor da inscrição, poderão pagar a anuidade (R\$ 80,00 para profissionais e R\$ 30,00 para estudantes) em até duas vezes.

Exibição Técnica

Stands com 4 ou 6 m², cada 3 m² dá direito a uma inscrição gratuita

Valores das inscrições:

Associados da Sobrac R\$ 450,00/m²

Não-associados da Sobrac R\$ 750,00/m²

Os valores acima são para pagamento até o dia do evento. Pagamentos parcelados e antecipados possuem as mesmas condições aplicadas às inscrições individuais.

Local

Teatro Tucarena - PUC / SP
Rua: Monte Alegre, 1024; CEP: 05014-001
Perdizes – São Paulo – SP
Tel.: (11) 3670-8455

Facilidades

- Acesso para deficientes físicos
- Estacionamentos conveniados no local
- Descontos em hotéis da região

Datas

Inscrição de resumos: até 24/09/2006

Inscrição do trabalho completo: até 05/11/2006

Inscrições e Informações

DERDIC,

Tel: 11-5539-6824 (08:00 - 17:00), Fany ou Arlete

Fax: 11-5539-6824 (24h)

Email: sobrac2006@acustica.org.br

Skype: sobrac_acustica

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/

4th International Conference on Bio-Acoustics

10-12 April, 2007, Loughboro, United Kingdom

www.ioa.org.uk

11th International Hand-Arm Vibration Conference

3-7 June, 2007, Bologna, Italy

www.associazioneitalianadiacustica.it/HAV

14th International Congress on Sound and Vibration (ICSV14)

09-12 July, 2007, Cairns, Australia

www.icsv14.com, veja também página 48.

36th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2007)

26-29 August, Istanbul, Turkey

www.internoise2007.org.tr

19th International Congress on Acoustics

2-7 September, 2007, Madrid, Spain

www.ica2007madrid.org/

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. 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



no.36 - dezembro 2005

- Investigação experimental da direcionalidade sonora de uma harpa de concerto
- Difusão sonora em salas de concerto e difusores
- Inarmonicidade e afinação de pianos
- Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva
- Congressos

The Fourteenth International Congress on Sound and Vibration (ICSV14), sponsored by the International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), the Australian Acoustical Society (AAS) and the University of New South Wales (UNSW) will be held at the Cairns Convention Centre in Cairns, Australia 9-12 July, 2007, in cooperation with the International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM), the American Society of Mechanical Engineers International (ASME International), and the Institution of Mechanical Engineers (IMechE).

Theoretical and experimental research papers in the fields of acoustics, noise and vibration are invited for presentation. Companies are invited to take part in the ICSV14 Exhibition.

The venue of the ICSV14 is the Cairns Convention Centre, voted the world's best congress centre in 2004 (AIPC Apex Award). Submission of abstracts (maximum 300 words) to <http://www.icsv14.com> by 1 December, 2006

Congress Chair: Nicole Kessissoglou
School of Mechanical and Manufacturing Engineering
The University of New South Wales
Sydney NSW 2052, Australia
Tel: (+61 2) 9385 4166
Fax: (+61 2) 9663 1222
n.kessissoglou@unsw.edu.au

Congress Secretariat,
Jodie Doyle
ICMS Australasia Pty Ltd
Level 9, 234 George Street
Sydney NSW 2000, Australia
Tel: +61 2 9254 5000
Fax: +61 2 9251 3552
Email: jodied@icmsaust.com.au

IIAV is an international non-profit scientific society affiliated with the Intern. Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM). IIAV currently has 550 individual members in 55 countries and is supported by 32 national and international scientific societies and organisations.

