

ENGENHARIA ACÚSTICA AUXILIADA POR COMPUTADOR: UM MÉTODO HÍBRIDO PARA SIMULAÇÃO DE ACÚSTICA DE SALAS

T. S. Camilo, R. A. Tenenbaum

LAVI - UFRJ

Av. Brigadeiro Trompowsky, s/nº, Centro de Tecnologia

Cidade Universitária - Ilha do Fundão

CEP. 21.941-590, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Tel.: 25628300. E-mail: roberto@serv.com.ufrj.br

J. L. Bento Coelho

CAPS - Instituto Superior Técnico

Lisboa, Portugal

Resumo – Diversos métodos numéricos para predição do campo acústico de recintos fechados têm sido desenvolvidos e experimentos numéricos incorporando combinações desses têm sido realizados, criando-se novos métodos híbridos. Uma das preocupações deste trabalho é focar na adequação dos modelos matemático-numéricos à realidade física, assim como apresentar novas técnicas para o aperfeiçoamento desses. 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 é amplamente discutida e testada através do programa de simulação RAIOS 3.0. Esse programa, que é também apresentado, prediz a distribuição sonora e os parâmetros de qualidade acústica de uma sala.

Palavras-chaves – acústica de salas, simulação numérica, método híbrido.

I. 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. Métodos numéricos transportam a realidade física para a linguagem computacional, e por isso analisá-los detalhadamente se tornou uma necessidade. Em particular, e de especial interesse devido a suas aplicações práticas, a simulação numérica em acústicas de salas tem despertado o interesse de diversos autores que têm se utilizado de distintos modelos de simulação.

Diversos métodos têm sido portanto desenvolvidos. Os métodos mais consagrados são o de traçado de raios, o das imagens ou das fontes virtuais, o de traçado de cones ou de pirâmides [3] e o de transição de energia [12,13]. Estudos comparativos entre diversos métodos

têm sido publicados [3,10,16]. Visto que a acústica de salas envolve vários fenômenos pertinentes à propagação do som, como a reflexão, a absorção, a difusão, a difração, a transmissão e a interferência, sua predição correta nem sempre pode ser atingida utilizando-se apenas um dos métodos numéricos descritos acima. Por essa razão, experimentos numéricos incorporando combinações desses têm sido realizados criando-se novos modelos de simulação, que são chamados métodos híbridos [1,11,15]. 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 das ondas, deve-se também modelar outros elementos tais como fontes, receptores e contornos da sala. Para fins de auralização, deve-se modelar também a função de transferência relativa à cabeça humana (HRTF).

Uma das preocupações deste trabalho é focar na adequação dos modelos matemático-numéricos desses elementos à realidade física. Exemplificando, 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 [5,6,14] e acústicos [2,7,8,17], atinge taxas de erros satisfatórias e reduz consideravelmente o tempo de processamento.

Dois métodos de simulação numérica serão discutidos neste trabalho. O primeiro a ser detalhado será o método 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. Algumas novas técnicas para o aperfeiçoamento desses modelos serão apresentadas. 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, chamado RAIOS 3.0.

II. TRAÇADO DE RAIOS

Nesse método, a modelagem da onda sonora é feita por analogia de raios acústicos. Cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da fase da onda. Propagando-se em linha reta o raio vai sendo submetido aos efeitos causados pelo ar e pelas superfícies de contorno da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. Usualmente o fenômeno de transmissão é incorporado ao de absorção. Chama-se especular a reflexão que obedece a lei de Snell, isto é, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. Essas reflexões especulares são obtidas para planos de superfície rígida com dimensões muito maiores do que o comprimento da onda incidente [5]. Qualquer parcela da energia da onda que se difunde propagando-se por direções diferentes da especular é considerada como reflexão não-especular, ou reflexão difusa.

A. 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. O método de geração aleatória de raios atinge, estatisticamente, um bom resultado somente para um grande número de raios. Outro modelo sugere a subdivisão de uma esfera unitária em octantes, seguido da subdivisão de cada octante em 6 triângulos de mesma área, e então, recursivamente, a subdivisão de cada um dos triângulos resultantes em áreas iguais até se encontrar um número próximo ao desejado de raios [4].

A modelagem para a fonte que apresenta os melhores resultados, no critério de homogeneidade na distribuição, se baseia na subdivisão dos lados do icosaedro. Cada uma das suas faces triangulares originais é subdividida recursivamente em 4 novos triângulos equiláteros. Esse processo de subdivisão é ilustrado na figura 1. Após um número n de subdivisões, obtemos um número NV de vértices

$$NV = 5 \left(2^{2n} - 2^n + 2 \sum_{m=1}^{2^n} m \right) + 2, \quad (1)$$

e um número NF de faces

$$NF = 20 \cdot 4^n. \quad (2)$$

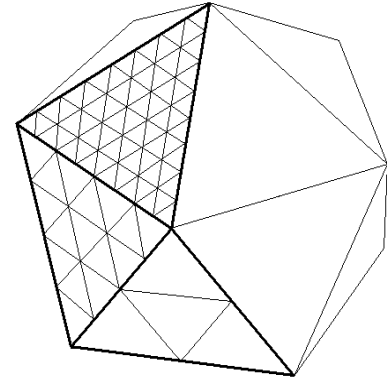


Figura 1. Subdivisão do icosaedro em triângulos equiláteros ($n = 0, \dots, 3$).

A partir da projeção desses vértices coplanares em uma superfície esférica de raio unitário concêntrica ao icosaedro, obtemos os cosenos diretores dos raios que serão emitidos. A figura 2 ilustra um dos triângulos do icosaedro após 6 subdivisões e nos mostra uma excelente homogeneidade, mesmo para poucos pontos.

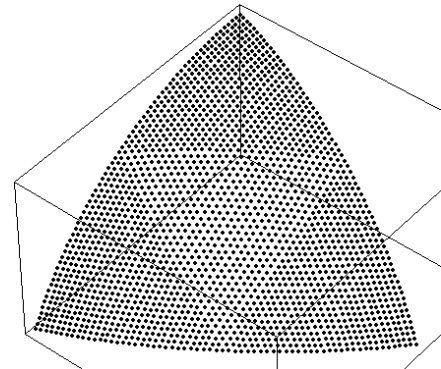


Figura 2. Fonte obtida a partir da subdivisão de 6ª ordem do icosaedro. $NV=642$ e $NF=1280$. Esta figura mostra a subdivisão apenas sobre um dos triângulos originais do icosaedro.

B. Modelagem das Reflexões

Outro fenômeno que devemos focar é a reflexão do raio acústico sobre uma superfície. O novo modelo proposto por Mommertz e Vorländer [9], no qual se baseia a nova norma ISO [5] (ainda em fase de elaboração), introduz o coeficiente de espalhamento δ que quantifica a parcela da energia refletida difusamente, conforme mostrado na figura 3. Esse coeficiente varia de 0, para reflexão puramente especular, a 1, para reflexão puramente difusa.

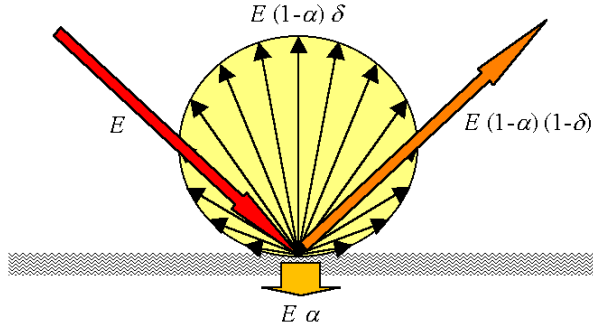


Figura 3. Distribuição da energia do raio incidente pela absorção, reflexão especular e espalhamento.

A modelagem de um ambiente no traçado de raios é toda baseada em geometria espacial, e a nova direção de um raio após uma reflexão é dada pela equação vetorial

$$\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_i - 2(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}, \quad (3)$$

onde \mathbf{r}_i é o vetor direção do raio incidente, \mathbf{n} é vetor normal a superfície de reflexão e \mathbf{r}_r é o vetor direção do raio refletido.

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

Na figura 3, E representa a energia transportada pelo raio, ao qual está associado um tempo de percurso igual, naturalmente, ao quociente entre a distância percorrida pelo raio e a velocidade de sua propagação. 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 igualmente por uma unidade de tempo, ou seja, a potência atribuída ao raio. Em ambos os casos, a energia do raio após várias reflexões é calculada pela relação

$$E = \frac{E_F}{NR} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \prod_i [(1-\alpha_i)], \quad (4)$$

onde E_F é a energia total emitida pela fonte, $D_{\alpha\beta}$ é a direcionalidade da fonte, NR é o número de raios, γ é o coeficiente de absorção do ar e d é a distância percorrida pelo raio.

C. Modelagem do Receptor

A captação do raio pela célula receptora também é outra modelagem de fundamental importância. Todos os modelos de recepção utilizados no método de

traçado de raios se baseiam em uma expansão volumétrica ao redor do ponto de medição virtual. Em medições acústicas reais, no momento da recepção temos uma frente de onda, assemelhando-se a uma superfície, transpassando um microfone, que se assemelha a um ponto. O contrário ocorre nas medições virtuais do traçado de raios onde o raio acústico intercepta em um ponto uma superfície de recepção. Essa inversão introduz um tratamento matemático que requer cuidados. A equação usualmente utilizada para o cálculo da energia E_R captada por um receptor esférico é

$$E_R = \frac{L}{cV} E, \quad (5)$$

onde L é ao comprimento do segmento de intercessão, c é a velocidade do som e V é o volume da esfera de recepção R , conforme ilustrado na figura 4.

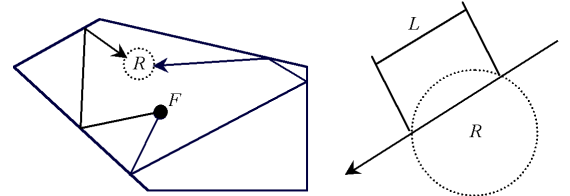


Figura 4. Método tradicional para captação dos raios emitidos pela fonte F .

Embora muito utilizada, a fórmula (5) oferece resultados pouco precisos uma vez que L/cV é apenas um fator aproximado. Uma melhor alternativa é a conversão da energia que chega ao receptor para intensidade. Para isso, ao invés de utilizarmos uma superfície esférica de recepção, utiliza-se uma área circular de imissão. Esse disco de recepção se baseia em uma expansão de área ao redor do ponto de medição virtual, que gira em torno de seu centro de modo que todo o raio acústico incida sobre ele perpendicularmente. A intensidade captada em um determinado instante t é

$$I_R(t) = \frac{\sum_i E_i}{\pi r^2}, \quad (6)$$

onde $\sum_i E_i$ é o somatório das energias dos raios incidentes em um exato instante t e r é o raio geométrico do disco de recepção.

Utilizando-se esse modelo encontramos ao final do processamento a resposta impulsiva média da região esférica R correspondente à rotação do disco de recepção, conforme

$$\bar{I}(t) = \frac{1}{V} \int_R \frac{e(t, \mathbf{x})}{\pi r^2} dv, \quad (7)$$

onde $V = 4\pi r^3/3$ e \mathbf{x} é o vetor posição no domínio R .

O valor de r sugerido para uma boa simulação é 15 cm, dimensão aproximada de uma cabeça humana, e o momento exato da recepção a ser considerado é o de sua interceptação no disco.

III. TRANSIÇÃO DE ENERGIA

Esse método é também chamado de método dos caminhos aleatórios, radiosidade (método utilizado em computação gráfica), ou método dos pacotes de energia. Ele se baseia na troca de energia entre a fonte, as superfícies e o receptor 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.

A. Modelagem da Fonte

Nesse método a fonte distribui toda sua energia pelas superfícies da sala. Modulando-se o espectro de potência da fonte segundo sua direcionalidade temos uma fonte virtual direcional. A parcela da energia emitida por uma fonte pontual F recebida por uma superfície varia proporcionalmente com seu ângulo sólido em relação a fonte, segundo a relação

$$E_S = E_F \frac{\Omega_{FS}}{4\pi} D_{\alpha\beta} e^{-\tau d}, \quad (8)$$

onde Ω_{FS} é o ângulo sólido da superfície S em relação ao ponto F e 4π é a área de uma superfície esférica de raio unitário.

Quanto maior a inclinação de uma superfície em relação à fonte menor é o valor de seu ângulo sólido e portanto menos energia ela receberá. Considera-se no cálculo do ângulo sólido de uma superfície apenas a parte visível desta a partir do ponto em questão, ou seja, planos intermediários diminuem a visibilidade e consequentemente também o valor de seu ângulo sólido. O tempo médio de chegada da energia em cada superfície é $\tau/2$. Essa aproximação é, a princípio, um tanto grosseira mas se fundamenta na alta velocidade de propagação do som, considerando portanto desprezíveis eventuais diferenças nos tempos de chegada. Uma vez que a energia da fonte é emitida podemos representar a distribuição das energias recebidas nas n superfícies por uma matriz linha $\mathbf{E}_0 = (E_{0_1}, E_{0_2}, E_{0_3}, \dots, E_{0_n})$, onde E_{0_i} é a energia recebida inicialmente na superfície i .

B. Modelagem das Reflexões e das Superfícies

O primeiro passo na modelagem de uma superfície no método de transição de energia é a sua subdivisão sequencial em elementos triangulares, conforme ilustrado na figura 5. Um dos cuidados necessários durante esse processo de subdivisão é o de atingir um valor aproximado para as áreas desses pequenos elementos de modo a se obter o máximo possível de homogeneidade no retalhamento das superfícies. Um valor empírico para a área final de cada elemento, que atinge resultados satisfatórios, é $A_T/1000$, onde A_T é a

área total das superfícies da sala. Todas as superfícies nesse método são consideradas como difusores perfeitos, ou seja, $\delta=1$, espalhando portanto a energia incidente por todas as direções.

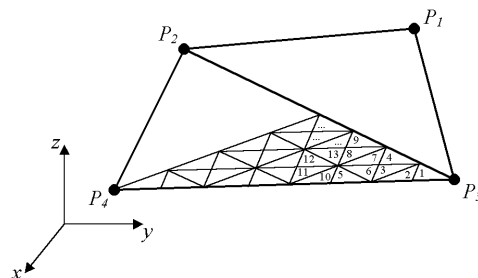


Figura 5. Subdivisão das superfícies e elementos triangulares.

Kruzins e Fricke em [12] sugerem uma modelagem uniforme na direcionalidade da energia refletida difusamente. Embora seja difícil definir uma modelagem que seja fisicamente correta para todos os materiais, temos em [9] uma modelagem mais próxima da realidade. Proposta por Vorländer e Mommertz, ela está baseada na lei dos cosenos de Lambert, conforme mostrado na figura 3. Essa direcionalidade é dependente somente do ângulo de elevação em relação ao plano de reflexão e pode também ser equacionada pela função seno na forma

$$S_\beta = 2 \sin \beta. \quad (9)$$

Após o processo de retalhamento precisamos definir qual a influência energética de cada elemento em relação a cada um dos outros. Essa influência dependerá basicamente da distância, da inclinação relativa e do ângulo sólido entre os elementos. O algoritmo usado em implementações computacionais desse método calcula os ângulos sólidos das superfícies originais da sala, não retalhadas, através de uma derivação do método de varredura *scanline*. Esse algoritmo atinge uma excelente precisão a custa de um demorado tempo de cálculo, ao contrário da técnica de retalhamento que atinge valores suficientemente aproximados com pouco processamento.

Cada um desses elementos triangulares 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

$$\Psi_{ij} = (1 - \alpha_i) \frac{\Omega_{ij}}{2\pi} S_\beta e^{-\tau d_{ij}}, \quad (10)$$

onde 2π é a área de uma superfície semi-esférica de raio unitário. Montando os elementos Ψ_{ij} em uma matriz quadrada $n \times n$ encontramos a matriz de transição de energia Ψ . Podemos encontrar a distribuição de energia nas superfícies após k transições através da equação matricial

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_0 \Psi^k. \quad (11)$$

C. Modelagem da Recepção

O último passo do processo de simulação ocorre quando cada um dos elementos triangulares reflete sua energia dentro da sala. Nesse método o receptor é modelado como um ponto de recepção captando a intensidade sonora oriundas das superfícies de contorno. A cada transição, cada elemento irá emitir na direção do receptor uma determinada quantidade de energia. Somando-as, encontra-se a intensidade I_R no receptor R através da relação

$$I_R((k+1)\tau) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_i^k}{2\pi d_{iR}^2} S_\beta \right), \quad (12)$$

considerando que o tempo médio de percurso da energia desde cada elemento até o receptor é aproximadamente $\tau/2$.

IV. MÉTODO HÍBRIDO

O método híbrido descrito a seguir utiliza uma combinação dos métodos descritos anteriormente como uma tentativa de 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. Iremos adotar então o traçado de raios para a simulação das reflexões especulares e o método de transição de energia para a simulação das reflexões difusas.

A. Processamento das Reflexões Especulares

O cálculo da resposta impulsiva neste novo método ocorre em duas etapas. Primeiramente processa-se as reflexões especulares, armazenando durante esse processamento as informações que serão usadas posteriormente no cálculo das reflexões difusas.

Emitido por uma fonte virtual, similar as descritas na seção I.A, um raio vai sendo submetido aos efeitos causados pelas superfícies de contorno enquanto simultaneamente é feita a identificação de sua passagem por uma superfície receptora. Ao incidir em um plano triangularizado, conforme mostrado na figura 5, 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 especulares é calculada pela expressão

$$E = \frac{E_F}{NR} D_{\alpha\beta} e^{-n\delta} \prod_{i=0}^n (1-\alpha_i)(1-\delta_i). \quad (13)$$

Utilizando-se a modelagem de superfícies por elementos triangulares de reflexão difusa, podemos identificar com maior precisão qual a região do plano

que foi atingida pelo raio. A esse elemento, onde ocorreu a incidência, será acrescentada uma parcela da energia do raio, dada pela expressão

$$E_{i,t} = E_{i,t} + E(1-\alpha_i)\delta_i, \quad (14)$$

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 \mathbf{E}_D , $n \times T_{60}$, onde n é o número total de elementos triangulares de reflexão difusa e T_{60} é o tempo de reverberação previamente estimado, em milissegundos, conforme ilustrado pela matriz abaixo.

$$\mathbf{E}_D \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & T_{60} \\ \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & \dots & E_{1,T_{60}} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & \dots & E_{2,T_{60}} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ E_{n,1} & E_{n,2} & \dots & E_{n,T_{60}} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Matriz 1. Matriz de energia difusa.

A cada reflexão do raio em um dos elementos de superfície a matriz \mathbf{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 \mathbf{E}_D inicial que representa, conforme dito anteriormente, 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. Utilizando-se de um modelo de recepção similar aos apresentados na seção II.C encontramos, ao final da primeira etapa, a resposta impulsiva especular $h_e(t)$ da sala.

B. Processamento das Reflexões Difusas

Na segunda etapa da simulação ocorre o processamento das reflexões difusas. A partir da matriz \mathbf{E}_D inicial calcula-se as transições de energia entre os elementos da sala. Inicia-se o processamento emitindo a energia de todos os n elementos de superfície da coluna $t=1$, segundo a modelagem de difusão apresentada na seção III.B, a todos os outros elementos visíveis da sala. Cada um dos elementos que recebe parte dessa energia refletida, a receberá em tempo distintos, ou seja em colunas distintas da matriz \mathbf{E}_D . Esses elementos, nos respectivos instantes, terão suas energias acrescentadas.

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

$$E_{j,t+\sigma} = E_{j,t+\sigma} + E_{i,t} \Psi_{ij}, \quad (15)$$

onde $\sigma = d_{ij}/c$.

Deve-se também calcular a transição de energia difusa entre cada elemento e o receptor, a cada instante t . Como a modelagem da reflexão nessa etapa do processamento é difusa, sempre que o receptor for visível em relação ao centro geométrico do elemento de superfície teremos a captação de energia, segundo a expressão

$$I_R(t+\sigma) = \frac{E_{i,t}}{2\pi d_{iR}^2} S_\beta, \quad (16)$$

onde $\sigma = d_{iR}/c$.

Percorrendo a matriz E_D de $t=1$ até $t=T_{60}$ e realizando as iterações dadas pelas expressões (15) e (16), encontramos a resposta impulsiva difusa da sala. Somando $h_e(t)$ com $h_d(t)$ encontramos a resposta impulsiva $h(t)$ virtual da sala.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Apresenta-se, a seguir, os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3.0, para uma sala de referência (estúdio de música) utilizada como padrão para uma intercomparação internacional de programas de simulação numérica, promovida pelo PTB (*Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*), Alemanha, denominada Round Robin 3. Essa intercomparação busca o aperfeiçoamento dos programas de simulação numérica de acústica de salas em desenvolvimento pelos diversos grupos de pesquisa na área ao redor do mundo e visa identificar os melhores métodos de simulação. Ao término da intercomparação serão fornecidos os resultados de medições na sala real.

Os parâmetros acústicos a serem calculados pelos programas participantes são: T30, EDT, D50, C80, TS, LF, LFC e IACC, tal como definidos pela norma ISO 3382 [6]. A definição (D50), o fator de clareza (C80) e o tempo central (TS) demandam a obtenção da resposta impulsiva da sala (RI). Para a determinação do tempo de decaimento inicial (EDT) e do tempo de reverberação (T30) é necessário, além da RI, obter-se as curvas de decaimento em função da banda de frequência. Finalmente para se obter as frações de energia lateral (LF e LFC) e a correlação cruzada interaural (IACC) é preciso ainda obter-se a RI binaural, incluindo-se a convolução com a função de transferência relacionada à cabeça humana (HRTF). Todos esses parâmetros foram calculados pelo programa RAIOS 3.0 para o Round Robin 3. A sala simulada está representada na figura 6, onde se vê também a tela principal do programa.

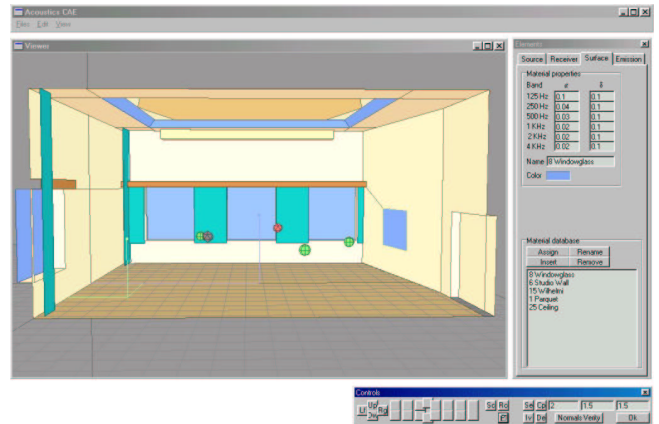


Figura 6. Estúdio de música utilizado como padrão no Round Robin 3.

A figura 7a mostra o invólucro da RI, em pressão quadrática, da sala simulada, obtida pelo método híbrido anteriormente descrito, para a fonte na posição 2 e o microfone na posição 3 (há duas posições para fonte e três de posições para microfone fixadas para a simulação). Observa-se que a parte intermediária e final da resposta impulsiva quadrática são mais próximas das formas esperadas para esse gênero de sala. Esse resultado é oriundo da difusão, implementada pelo modelo híbrido. Observe, na figura 7b, que as curvas de decaimento por bandas de oitava obtidas a partir daquela resposta impulsiva, apresentam uma linearidade compatível com a difusividade da sala.

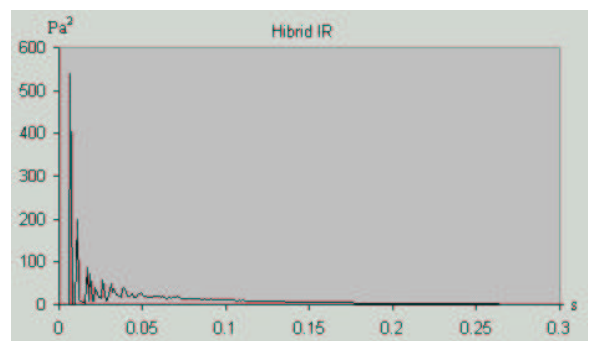


Figura 7a. Invólucro da resposta impulsiva quadrática

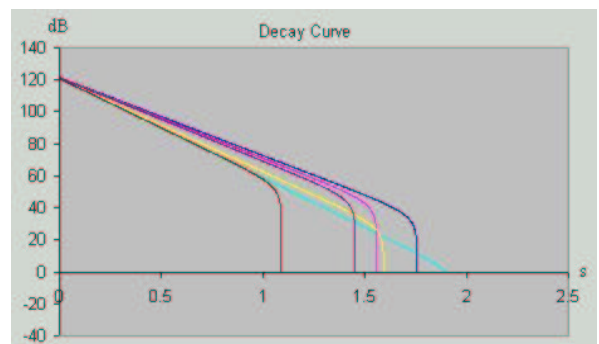


Figura 8a. Curvas de decaimento por banda de frequência

Na figuras 8a e 8b, abaixo, é mostrado o resultado do parâmetro LF. A figura 8a ilustra os diferentes valores obtidos para cada par de posição fonte-microfone. A linha mais grossa corresponde aos resultados do RAIOS 3.0 enquanto as outras linhas correspondem aos outros participantes. Na figura 8b encontramos, para a posição fonte 2 - microfone 3, os valores obtidos por banda de oitava.

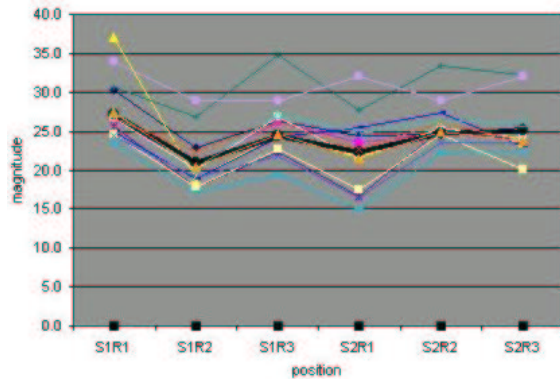


Figura 8a. Parâmetro LF para 125 Hz para cada par de posição fonte-microfone.

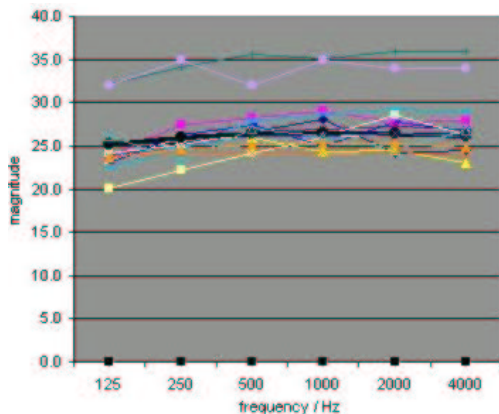


Figura 8b. Parâmetro LF para a fonte 2 - microfone 3 para cada banda de frequência.

VI. CONCLUSÕES

A principal desvantagem do método de traçado de raios é a necessidade de grande número de raios para se calcular corretamente a parte intermediária e final da RI. Isso se deve à divergência natural entre os raios que aumenta a separação entre eles à medida que se propagam. Essa separação, após pouco tempo de propagação, vem a ser maior que a superfície receptora de modo que a passagem da frente de onda pode não ser identificada. Ao contrário, o método de transição de energia, utilizando-se de um tratamento estatístico para a propagação do som no ambiente, demonstrou grande simplificação nos cálculos e a diminuição da exigência de alta capacidade de processamento para uma simulação mais correta da parte intermediária e final da RI.

A combinação desses dois métodos numéricos demonstrou ótimos resultados, o que pode ser verificado na figura 9, visto que estão dentro dos valores esperados e na média dos resultados calculados pelos outros programas participantes do Round Robin 3. As curvas de decaimento calculadas também apresentam grande linearidade, o que ocorre nas curvas 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. A. Lewer, "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics", *Applied Acoustics* 38(2-4), 1993, p.161-178.
- [2] K. H. Kuttruff, "Room Acoustics", 4th ed., Spon Press, London, UK, 2000.
- [3] A. Farina, "RAMSETE-A new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems", *Proceedings of Euro-Noise, France, 1995*.
- [4] R. A. Tenenbaum, J. G. Slama, M. L. Ballesteros, "Numerical simulation of room acoustics: a new approach for source modelling", *Proceedings 14th International Congress on Acoustics, Beijing, 1992*.
- [5] ISO/WD 17487:2001 Acoustics, "Measurement of the Random-incidence Scattering coefficient of Surfaces".
- [6] ISO 3382:1997 Acoustics, "Measurement of the reverberation time of rooms with reference to others acoustical parameters".
- [7] T. Hargreaves, T. Cox, Y. Lam, "Surface Diffusion Coefficients for Room Acoustics: Free-field Measures", *J. Acoust. Soc. Am.* 108(4), 2000, p.1710-1720.
- [8] M. Kleiner, H. Gustafsson, J. Backman, "Measurement of directional scattering coefficients using near-field acoustic holography and spatial transformation of sound fields", *J. Audio Eng. Soc.* 45(5), p.331-345.
- [9] M. Vorländer, E. Mommertz, "Definition and Measurement of Random-incidence Scattering Coefficients", *Applied Acoustics* 60, 2000, p.187-199.
- [10] U. Stephenson, "Comparison of the Mirror Image Source Method and the Sound Particle Simulation Method", *Applied Acoustics* 29, 1990, p.35-72.
- [11] M. Vorländer, "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, p.172-178.

- [12] E. Kruzins, F.Fricke, “The Prediction of Sound Fields in Non-diffuse Spaces by a ‘Random Walk’ Approach”, *Journal of Sound and Vibration* 81(4), 1982, p.549-564.
- [13] D. Alarcão, J. L. Bento Coelho, R. A. Tenenbaum, “On Modelling of Room Acoustics by a Sound Energy Transition Approach”, *Proceedings of Acustica, Madrid, 2000*.
- [14] ABNT NBR 12179, “Tratamento acustico em recintos fechados, 1992.
- [15] J. H. Rindel, G. Naylor, “Computer Modelling of Sound Fields in Rooms – The State of the Art and Outlook to the Future”, *Proceedings 14th International Congress on Acoustics, Beijing, 1992*.
- [16] K. H. Kutruff, “Simulation Models for Auralization in Room Acoustics”, *Proceedings 14th International Congress on Acoustics, Beijing, 1992*.
- [17] E. Mommertz, “Determination of Scattering Coefficient from the Reflection Directivity of Architectural Surfaces”, *Applied Acoustics* 60, 2000, p.101-103.