

MÉTODO HÍBRIDO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ACÚSTICA DE SALAS: TEORIA, IMPLANTAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Roberto Aizik Tenenbaum & Thiago Schaaf Camilo

Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

rtenenbaum@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo: A simulação numérica de acústica de salas 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. Esse 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.

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 raios¹ o das imagens ou das fontes virtuais,² o de traçado de cones ou de pirâmides³ e o de transição de energia.⁴ Visto que a acústica de uma sala 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 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 também 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 pelas 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.^{7,8,9} Acompanhando esses resultados, várias medições têm sido realizadas com o objetivo de compreender e modelar o fenômeno da difusão.^{10,11,12,13,14,15,16} 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),¹⁷ 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 para diversos materiais. O

segundo é chamado de coeficiente de difusão e é definido pela norma AES-4id-2001 (2001).¹⁹ 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. 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 DO 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 Fig. 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 subdividida recursivamente em novos triângulos, aproximadamente equiláteros. Esse processo de subdivisão é ilustrado na Fig. 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

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

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 Fig. 3 ilustra um dos triângulos do icosaedro após 65 subdivisões e nos mostra uma excelente homogeneidade, mesmo para poucos pontos (~40 k).

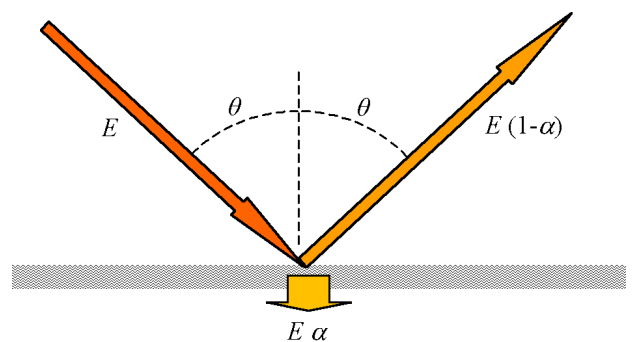


Figura 1: Reflexão especular

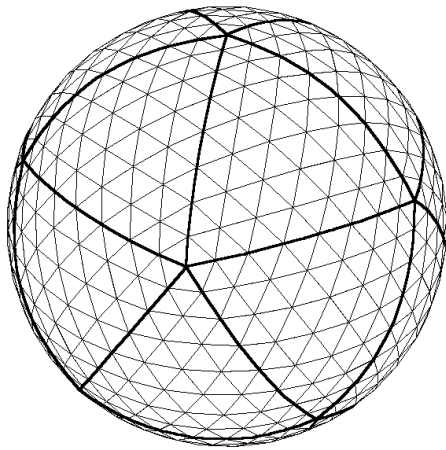


Figura 3: Subdivisão sobre um dos triângulos originais do icosaedro (n = 65)

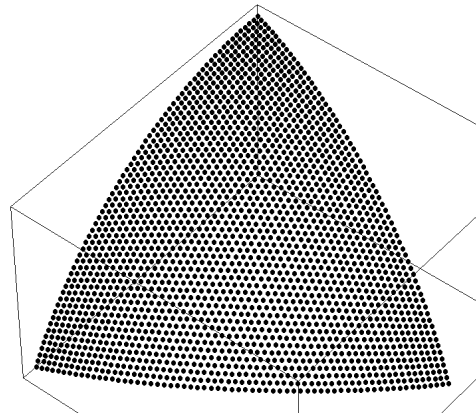


Figura 2: Subdivisão a partir do icosaedro (n = 8)

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)¹¹ introduz o coeficiente de espalhamento, δ , que quantifica a 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 subdivida 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 Fig. 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 em relação 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 mas se fundamenta na velocidade de propagação do som, considerando portanto desprezíveis eventuais diferenças nos tempos de chegada com respeito à média. Não nos esqueçamos 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 $\mathbf{E}_0 = (E_{0_1}, E_{0_2}, E_{0_3}, \dots, E_{0_n})$, onde E_{0_i} é a energia recebida inicialmente na superfície i .

3.1. 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 cosenos de Lambert¹⁰ conforme mostrado na Fig. 4. Essa direcionalidade depende somente do ângulo de elevação β em relação à superfície, podendo ser expressa pela relação simples:

$$S_\beta = 2 \operatorname{sen}\beta \quad (4)$$

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

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_0 \Psi^k \quad (6)$$

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

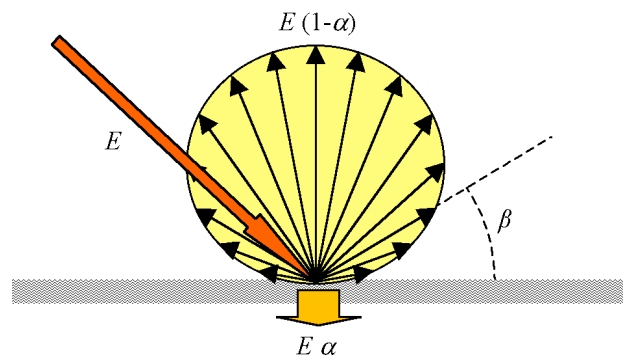


Figura 4: Reflexão difusa

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 neste novo 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 seguinte expressão:

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

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

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

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

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 \mathbf{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:

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

A cada reflexão do raio em um dos elementos a matriz \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 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 especular $h_e(t)$ da sala.

4.2. Processamento das Reflexões Difusas

Na segunda etapa da simulação ocorre o processamento das reflexões difusas. A partir da matriz \mathbf{E}_D inicial calculam-se as transições de energia entre os elementos de superfície da sala. Inicia-

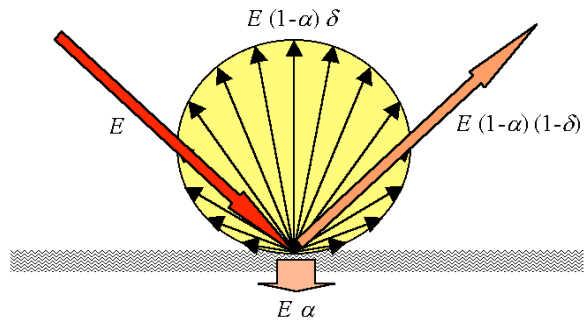


Figura 5: Efeito combinado de reflexão especular e difusa

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 \mathbf{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 \mathbf{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 Fig. 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 e são associados os coeficientes de absorção e 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: $N_R = 500k$, $\Delta L = 60$ dB, $N_E = 1k$ e $\Delta t = 1$ m s.

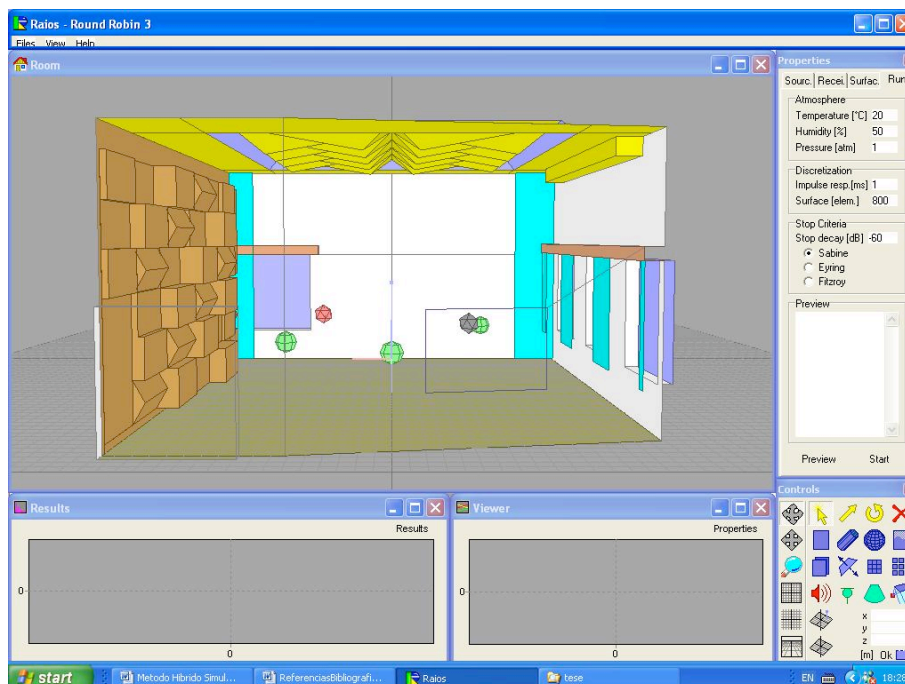


Figura 6: Tela principal do código computacional RAIOS 3

O programa apresenta cinco módulos de tela, como visto na Fig. 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 escolhido. 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 3382.¹⁷ 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 NUMÉRICOS

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

As Figs. 7 a 10 mostram os invólucros das respostas impulsivas, em pressão quadrática, da sala simulada obtida pelo método híbrido. A Fig. 7 ilustra a RI referente ao processamento das reflexões especulares, enquanto que a Fig. 8 mostra a RI referente ao processamento das reflexões difusas. Finalmente, superpondo ambas, obtemos a RI final da sala, apresentada na Fig. 9. Observe, na Fig. 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 Fig. 10 apresenta corresponde ao que efetivamente sucede ao levantarmos curvas de decaimento a partir de resultados experimentais em salas.

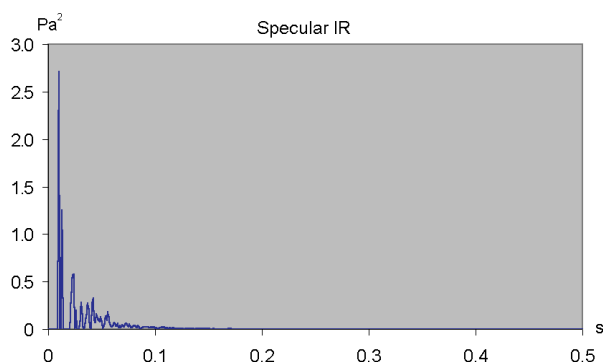


Figura 7: RI especular (parte inicial)

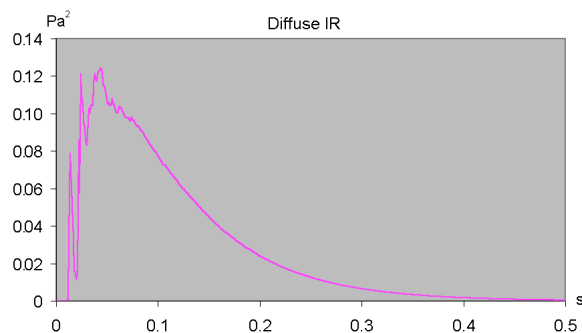


Figura 8: RI difusa (parte inicial)

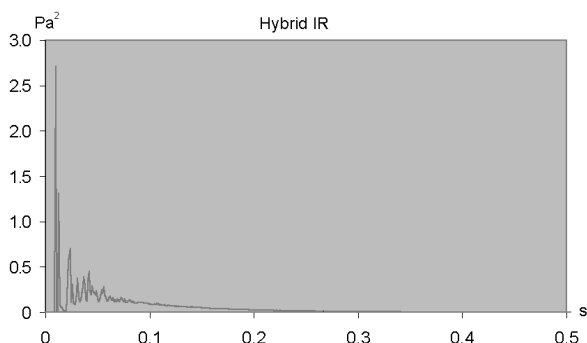


Figura 9: RI híbrida (parte inicial)

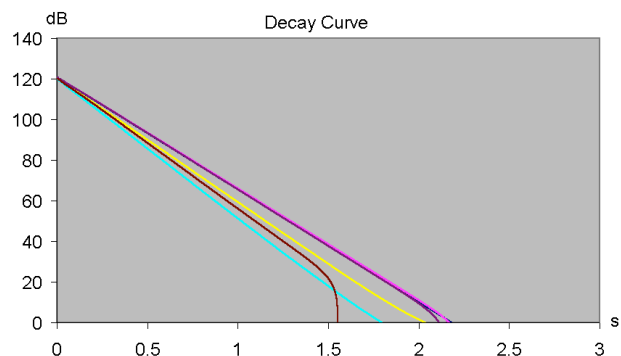


Figura 10: Curvas de decaimento

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 tem 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 Fig. 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 Fig. 12. Duas situações compuseram essa fase: sala com cortinas abertas e sala com cortinas fechadas, duplicando portanto o número da situações a serem simuladas.

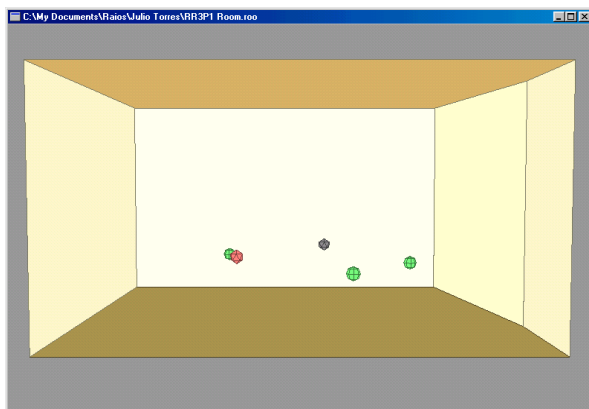


Figura 11: Sala da fase 1 do RR3

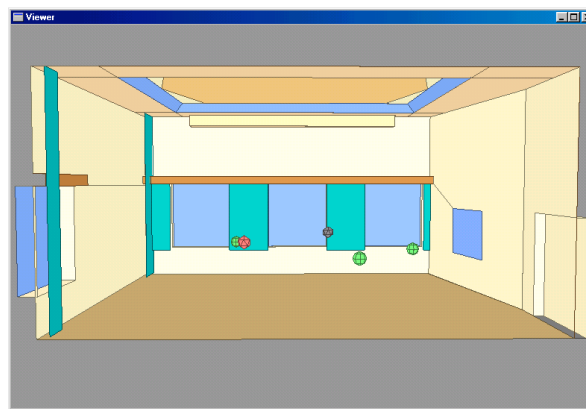


Figura 12: Sala da fase 2 do RR3

Finalmente, na fase 3, todos os detalhes do *design* da sala foram fornecidos, incluindo os perfis do teto e parede difusoras, conforme mostrado na Fig. 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 *Acustica united with ActaAcustica*, 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 efeitos da difusão. No entanto, na fase final e mais próxima da sala real, foi utilizado o RAIOS 3 com as implementações já descritas.

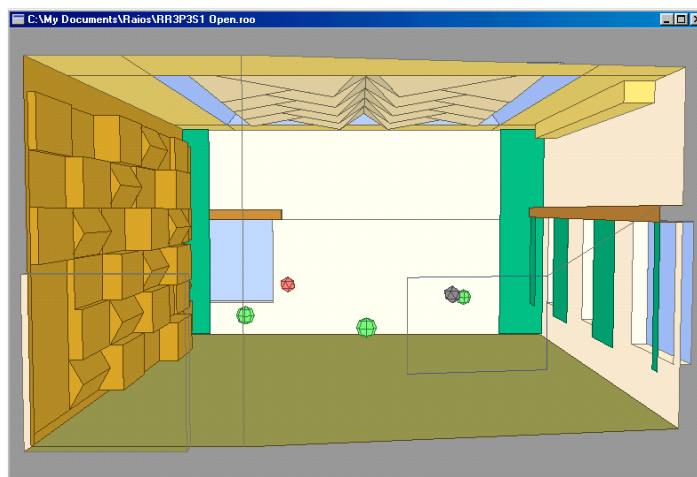


Figura 13: Sala da fase 3 do RR3

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. Os 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 Figs. 14 a 19. Os resultados completos estão disponíveis na página do PTB.²⁰ Nessas figuras vemos os resultados dos parâmetros T_{30} , C_{80} e TS.

Os valores dos parâmetros encontrados pelo programa RAIOS 3 estão plotados em linha grossa branca de pontos circulares, e os resultados experimentais estão plotados em linha grossa preta de pontos quadrados com suas respectivas incertezas de medição. Os valores obtidos por todos os outros participantes estão plotados em linhas finas, com cores diversas. O tempo de processamento para a obtenção desses resultados em um microcomputador com processador Athlon de 1.2 GHz, foi de aproximadamente 1h30', exigindo aproximadamente 100 Mbytes de memória. (No atual estado da tecnologia disponível para computadores pessoais, esse tempo reduz-se a cerca de 20 minutos.)

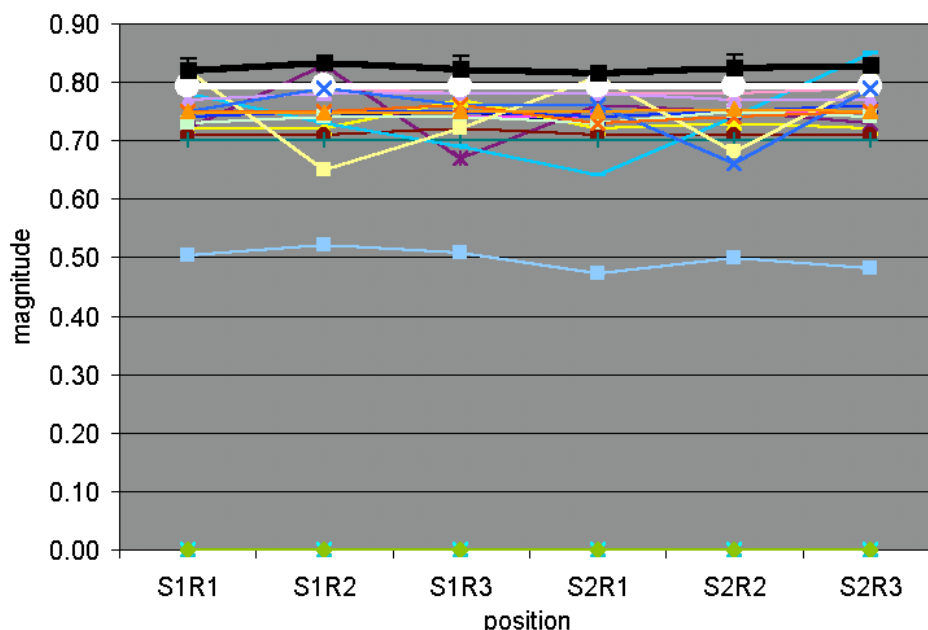


Figura 14: T_{30} em 2 kHz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas fechadas

A Fig. 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. Observe-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 grafados na Fig. 15. Agora 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.

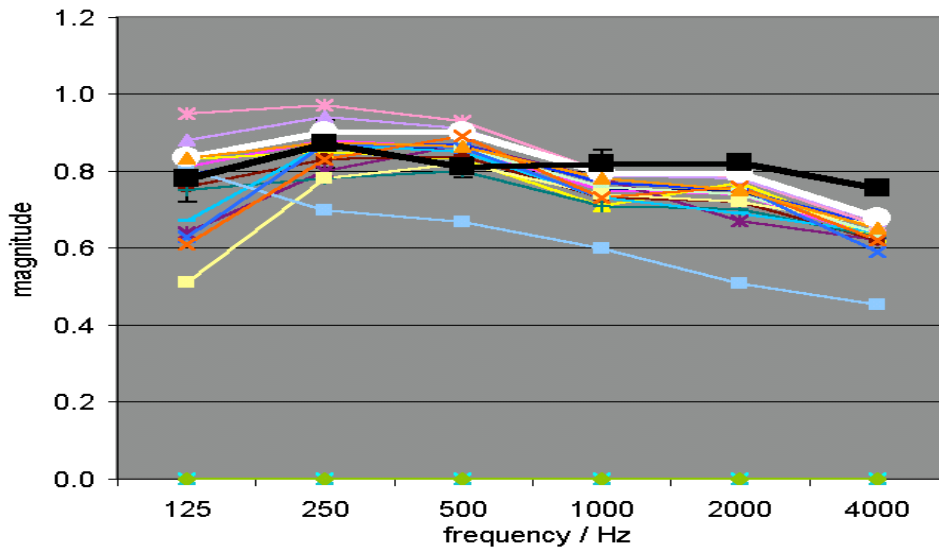


Figura 15: T_{30} para fonte 1 e receptor 3 em cada banda de frequência, cortinas fechadas

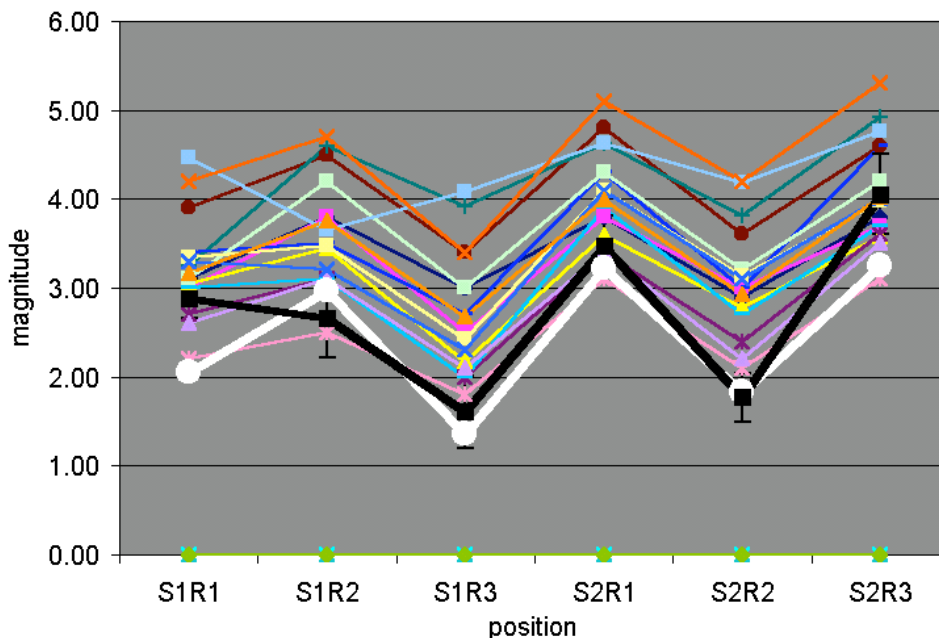


Figura 16: C_{80} em 250 Hz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

A Fig. 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.

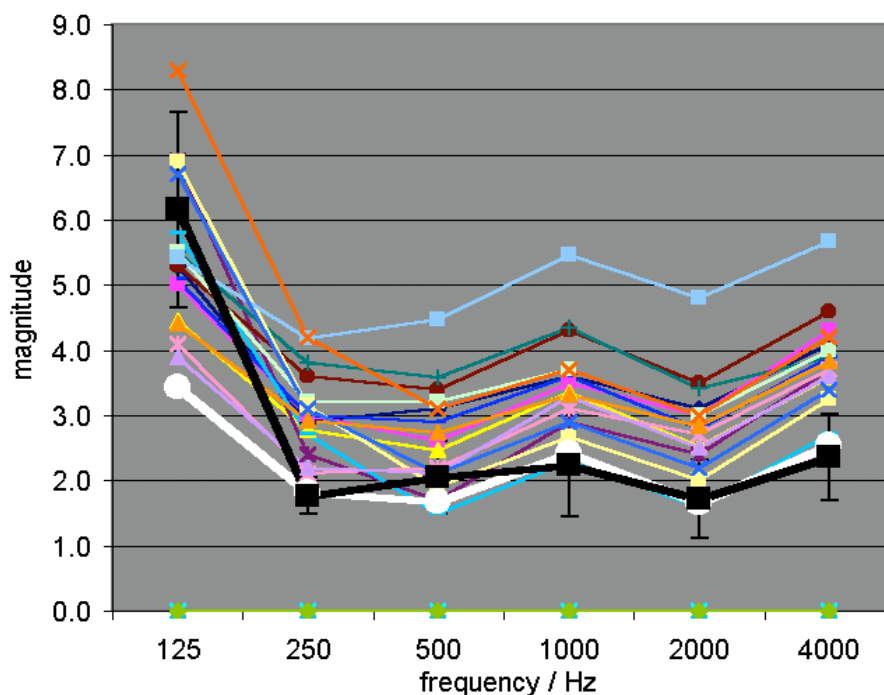


Figura 17: C_{80} para fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

A Fig. 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 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 erram e o código computacional RAIOS 3 não foi exceção.

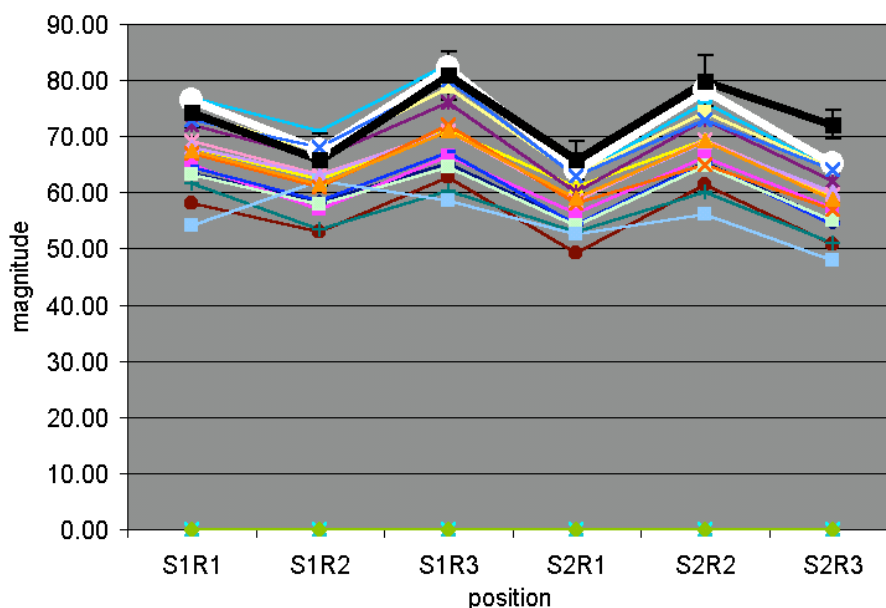


Figura 18: TS em 1 kHz para cada combinação entre fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

A variação espacial do parâmetro acústico denominado tempo central, TS , para a frequência de 1 kHz e sala com cortinas abertas é plotada na Fig. 18. Aqui observa-se também uma variância bastante grande; por exemplo, na posição S1R3, os resultados variam de 58 a 82 ms. Novamente, o

programa RAIOS 3 apresentou resultados bastante próximos dos experimentais para todas as posições de fonte e receptor.

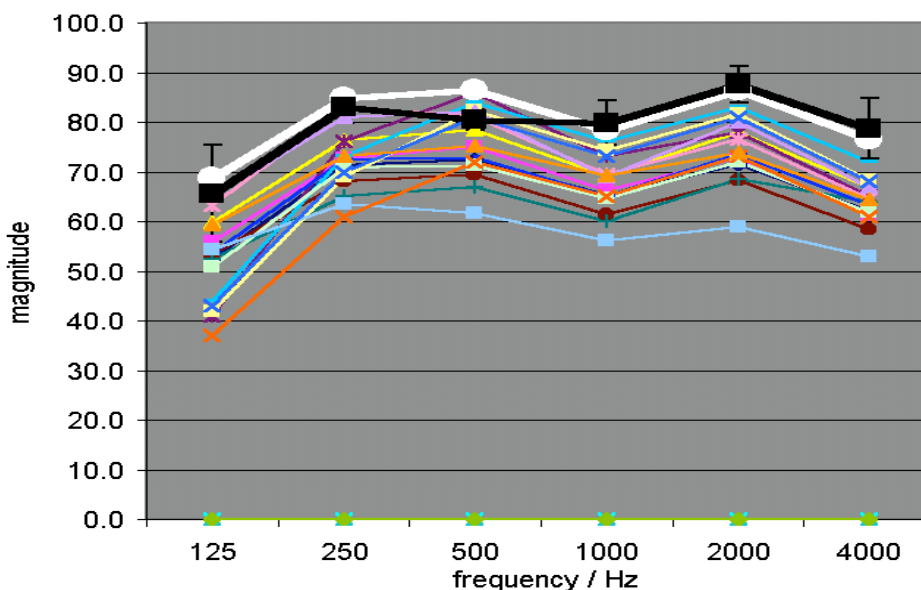


Figura 19: TS para a fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

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 Fig. 19. Mais uma vez o programa RAIOS 3 apresenta resultados altamente confiáveis na simulação, afastando-se um pouco somente na banda de 500 Hz.

Embora os resultados apresentados constituam apenas uma amostra das planilhas Exel encontráveis no *site* do PTB,²⁰ 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.

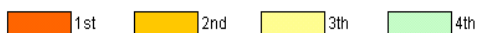
8. ERROS MÉDIOS RELATIVOS

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, relativos 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 cores indicadas. As Figs. 20 e 21 nos mostram, em gráficos de barras, o resultado geral de cada participante.

Observando a Tabela 1 e as Figs. 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* - corresponde à barra amarela, indicada pela seta -, credenciando-se como um simulador bastante confiável.

RELATIVE MEAN ERROR (%)

For all source-receiver combinations and frequency bands



OPEN CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
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	8.04	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	9.73	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	9.33	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	22.22	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	7.29	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	3.93	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	20.09	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	25.13			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	11.52	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	13.22			14.90

CLOSED CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
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	6.61	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	12.53	11.73	11.56	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	12.74	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	22.00	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	18.18	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	4.82	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	25.17	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	32.89			33.40
IACC		19.84	12.88				18.93		15.48		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	14.58	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	16.87			14.69

OPEN AND CLOSED CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
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	13.05	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	15.04			14.79

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

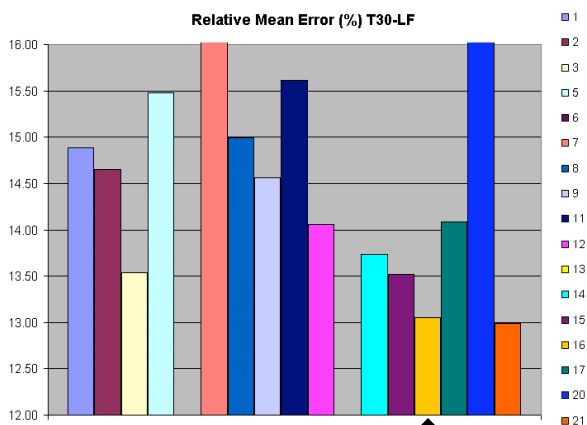


Figura 20: Erro médio relativo do parâmetro T₃₀ ao LF

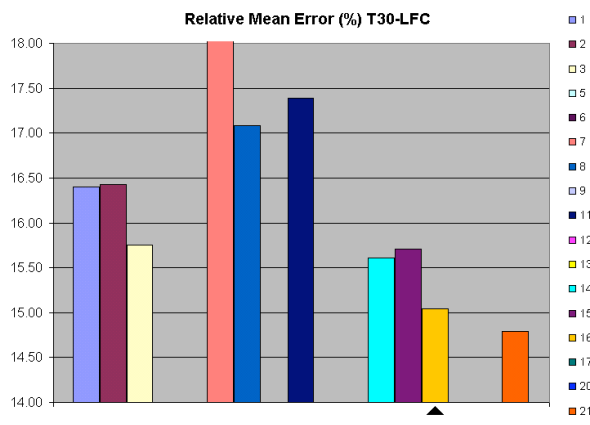


Figura 21: Erro médio relativo do parâmetro T₃₀ ao LFC.

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 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 [21,22]. Resulta que se os dados de entrada são imprecisos ou mesmo inexistentes, 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.^{23,24,25} 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,²⁶ 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.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kulowski, A., Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique, *Appl. Acoust.*, 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, *Appl. Acoust.*, 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, *Appl. Acoust.*, 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., Natsiopoulos, 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] ISO/WD 17487, Acoustics-Measurement of the Random-incidence Scattering Coefficient of Surfaces, *Intern. Organiz. Stand.*, 2001.
- [12] Lam, Y. W., A comparison of three diffuse reflexion modelling methods used in room acoustics computer models, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, pp. 2181 - 2192, 1996

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Farina, A., A New Method for Measuring the Scattering Coefficient and the Diffusion Coefficient Panels, *Acust.-acta acust.*, 86, 2000.
- [16] Mommertz, E., Determination of Scattering Coefficients from the Reflection Directivity of Architectural Surfaces, *Appl. Acoust.*, 60, 2000.
- [17] ISO 3382, Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Others Acoustical Parameters, Intern. Organiz. Stand., 1997.
- [18] ISO/WD 17487, Acoustics-Measurement of the Random-incidence Scattering Coefficient of Surfaces, Intern. Organiz. Stand., 2001.
- [19] AES-4id-2001, AES Information Document for Room Acoustics and Sound Reinforcement Systems – Characterization and Measurement of Surface Scattering Uniformity, *Audio Eng. Soc.*, 2001.
- [20] PTB home-page, http://www.ptb.de/de/org/1/14/1401/_index.htm, 2002.
- [21] Araújo, M.A.N., Investigações sobre os parâmetros intervenientes na medição de absorção sonora em câmara reverberante, Tese D.Sc, COPPE, UFRJ, 2002.
- [22] 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.*
- [23] 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.*
- [24] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., HRTF modeling for efficient Auralization, *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Eletronics, CD, 2003.*
- [25] 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, Canadá, CD, Vol. IV, pp. 33_36, 2004.*
- [26] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., An efficient wavelet based HRTF model for auralization, *Acustica united with Acta Acustica, Vol 90(1), pp 108-120, 2004.*