

COLISEO – UMA TÉCNICA EFICIENTE PARA ACÚSTICA DE SALAS COM BASE NUM PROCESSO DE MARKOV

REFERENCIA PACS: 43.55.Ka

A. M. Almeida, T. Abreu, N. Fonseca, J.L. Bento Coelho
CAPS – Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, N° 1
1049-001 Lisboa, Portugal

ABSTRACT

The most common room design techniques, usually based on ray-tracing or other geometrical methods may be rather time consuming in a high degree of accuracy is refused. An alternative procedure was developed by considering three dimensional phonon random walks. A user friendly computer interface was included, as well as a database with material properties. Sound pressure distribution, reverberation time, intelligibility indexes (such as ALcons, AI, SI) and sound clarity indexes (C_{50} , C_{80}) in the room are estimated with a faster computation time than with other techniques.

INTRODUÇÃO

A avaliação dos parâmetros acústicos de salas, nomeadamente a distribuição do nível sonoro, os tempos de reverberação e os índices de inteligibilidade, é da maior importância, especialmente ao nível de projecto. As teorias estatísticas clássicas falham na obtenção de resultados satisfatórios quando comparados com técnicas de simulação mais elaboradas, geralmente baseadas em ray-tracing ou método de imagens, excepto em situações ideais. Previsões mais elaboradas podem tornar-se bastante lentas sobretudo num processo de optimização de soluções.

Procurou desenvolver-se uma ferramenta de previsão baseada na técnica de “random walk” de fonões. Foi escrito um programa de computador para calcular os parâmetros acústicos mais relevantes de campos sonoros em espaços fechados com diferentes materiais constituintes das paredes e com geometria arbitrária. A computação terá de ser rápida e o utilizador deverá ter uma boa interacção com o programa através do interface gráfico.

MÉTODO

Considere-se um espaço fechado limitado por paredes planas de radiação difusa e uma fonte sonora omni-direccional. O campo sonoro resultará da radiação de um grande número de pacotes de energia sonora, os fonões acústicos. O movimento de um fonão depois de deixar a fonte sonora e até ser detectado será considerado aleatório.

As várias superfícies das paredes que o fonão pode encontrar podem ser definidas como W_1, \dots, W_n . Assume-se que um fonão é emitido da fonte e vai colidir com a parede W_i .



Dentro do espaço fechado, o fonão vai ser radiado, no intervalo de tempo ε , desde W_i até W_j com a probabilidade $\langle j|P|i \rangle$. Este processo é repetido no intervalo de tempo seguinte 2ε . A posição mais provável do fonão depende do seu percurso anterior. Se o fonão está inicialmente em W_i , pode ser definido um vector de posição inicial $E^0 = (0,0,0,0,\dots,1,\dots,0)$ onde a posição i representa a probabilidade unitária do fonão se encontrar inicialmente sobre a parede W_i . Após o intervalo de tempo ε , durante o qual ocorreu a reflexão, obtem-se

$$E^1 = (\langle 1|P|i \rangle, \langle 2|P|i \rangle, \dots, \langle n|P|i \rangle)$$

onde $\langle k|P|k \rangle = 0$, pois uma parede não pode radiar para si mesma. Com a matriz de probabilidades P , cujas entradas são $\langle j|P|i \rangle$ com $i, j = 1, 2, \dots, n$ e a soma de cada linha é igual a unidade, o vector posição após k transições ocorridas no intervalo de tempo $k\varepsilon$ é dado por [1] $E^k = E^0 P^k$, onde P^k representa a k -ésima potência de P . A entrada i do vector posição E^k representa a probabilidade de um fonão se encontrar sobre a parede W_i após k sucessivas reflexões. Os sucessivos passos são considerados independentes, portanto, a evolução do fonão pode ser vista como um "Processo de Markov".

Para uma população de fonões, o vector inicial E^0 é dado por $E^0 = (e_1^0, e_2^0, \dots, e_n^0)$, onde e_i^0 é a densidade (de energia) inicial de fonões, a qual é considerada constante ao longo de toda a superfície de W_i . Portanto, a componente i de $E^k = E^0 P^k$ define a densidade de fonões sobre W_i decorridas k transições.

Para a densidade de fonões sobre todas as superfícies das paredes, considera-se que são emitidas ondas esféricas por uma fonte omni-direccional

$$e_j^0 = \frac{\Omega W}{4pA_j}$$

onde Ω é o ângulo sólido de W_j em relação à fonte, A_j é a área da parede e W é a potência sonora da fonte.

As probabilidades de transição $\langle j|P|i \rangle$ são definidas ao ter em conta a área da superfície de cada parede, assim como é considerado o ângulo visível das mesmas superfícies, como sendo visto, por exemplo, a partir do centro da parede W_i . A matriz P é transformada na matriz de transição T [1], tendo em conta fenómenos de absorção. Os coeficientes de absorção α_j de cada superfície e o coeficiente de absorção do som no ar m , ambos dependentes da frequência, são incluídos

$$T_{ij} = (1 - \alpha_j) \langle j|P|i \rangle e^{-m\bar{d}_{ij}}$$

onde \bar{d}_{ij} é a distância média entre W_i e W_j .

Se o vector posição inicial E^0 for multiplicado por T , em intervalos discretos definidos pelo tempo e transição $\tau = 4V/cS$ [2] (V = volume do espaço fechado, S = área total, c = velocidade do som), a energia sonora pode ser calculada em "tempo real".

A intensidade sonora num ponto particular $\{x, y, z\}$, devido à radiação difusa de uma superfície W_j , com densidade de energia constante e_j^i é [3]



$$I_j^i(x, y, z) = \frac{e_j^i \Omega_j (1 - a_j)}{p^2}$$

onde Ω_j é o ângulo sólido de W_j em relação a $\{x, y, z\}$. A intensidade sonora total radiada no estado estacionário é dada por [4-5]

$$I_r(x, y, z) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=0}^k I_j^i(x, y, z)$$

onde k é a última transição, onde a densidade de energia sobre as superfícies tornou-se desprezável. O nível de pressão sonora é obtido da totalidade da intensidade sonora reflectida $I_r = p_r^2 / 3rc$, onde se assume que o campo sonoro dentro do espaço fechado não é nem directo ($I_r = p_r^2 / rc$) nem difuso ($I_r = p_r^2 / 4rc$). A contribuição do som directo emitido pela fonte terá de ser adicionada para obter o nível de pressão sonora total Lp [6]

$$Lp = 10 \log \left[\frac{rc}{(2 \times 10^{-5})^2} \left(\frac{W}{4p r^2} + 3I_r(x, y, z) \right) \right]$$

onde r é a distância entre o ponto receptor $\{x, y, z\}$ e a fonte.

A resposta impulsiva é determinada [4] ao considerar todas as k transições sobre um intervalo de tempo $k\tau$

$$I_r(kt) = \sum_{j=1}^n \frac{e_j^k \Omega_j (1 - a_j)}{p^2}$$

O tempo de reverberação T_{60} pode ser obtido ao determinar a transição k na qual o nível de intensidade tenha caído 60 dB, da resposta impulsiva.

Os índices de inteligibilidade podem ser determinados através dos processos de integração habituais.

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A teoria foi implementada em computador num ambiente de programação em Visual C++ [7]. Esta ferramenta foi considerada a mais adequada para esta implementação, devido às suas propriedades ecléticas, abrangendo desde cálculos matemáticos complexos até à possibilidade de criar um interface gráfico de agradável utilização.

Os ângulos sólidos são determinados através de algoritmos de computação gráfica modificados. Foram feitos grandes esforços na minimização da ocupação de memória e do tempo de cálculo.

O interface faz uso de diversas caixas de diálogo, onde o utilizador pode editar as paredes da sala, fontes sonoras (potência, directividade, localização) e pontos receptores. Foi incluída uma extensa base de dados, que contém os coeficientes de absorção para uma grande variedade de materiais constituintes das paredes e as directividades das fontes, e que pode ser editada. São permitidas fontes sonoras múltiplas com diferentes tempos de atraso. É também considerada a influência da humidade relativa do ar.



O desenho da sala, com as fontes sonoras, pontos receptores e os mapas dos parâmetros acústicos são mostrados numa janela típica de CAD em 3D, onde se incluem funções de zoom e rotação. Também é mostrado um relatório com os resultados para cada ponto receptor.

O programa COLISEO é capaz de importar ficheiros de CAD (DXF) e de exportar os relatórios e imagens da janela 3D.

RESULTADOS

O modelo COLISEO calcula os parâmetros acústicos mais relevantes: distribuição de pressão sonora, tempo de reverberação, índices de inteligibilidade (ALcons, AI, SI, TS, STI) e índices de clareza (C_{35} , C_{50} , C_{80} , C_{95} e U_{80}). Os resultados são calculados para posições específicas ou para áreas de audiência.

Os níveis de pressão sonora e os tempos de reverberação podem ser determinados para uma determinada frequência ou sobre todos os valores num intervalo de 63Hz a 8kHz.

As figuras 1 e 2 mostram resultados típicos para distribuições de tempos de reverberação e de níveis de pressão sonora em dois auditórios diferentes. A figura 3 mostra um excerto de um relatório típico.

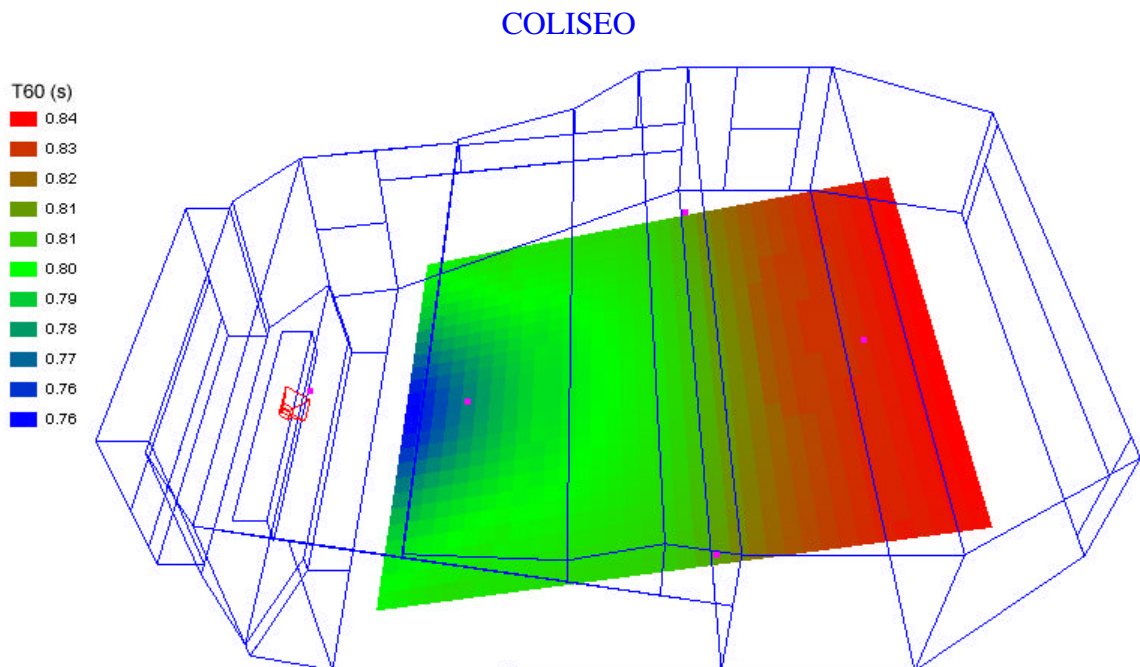


Figura 1. Tempo de reverberação



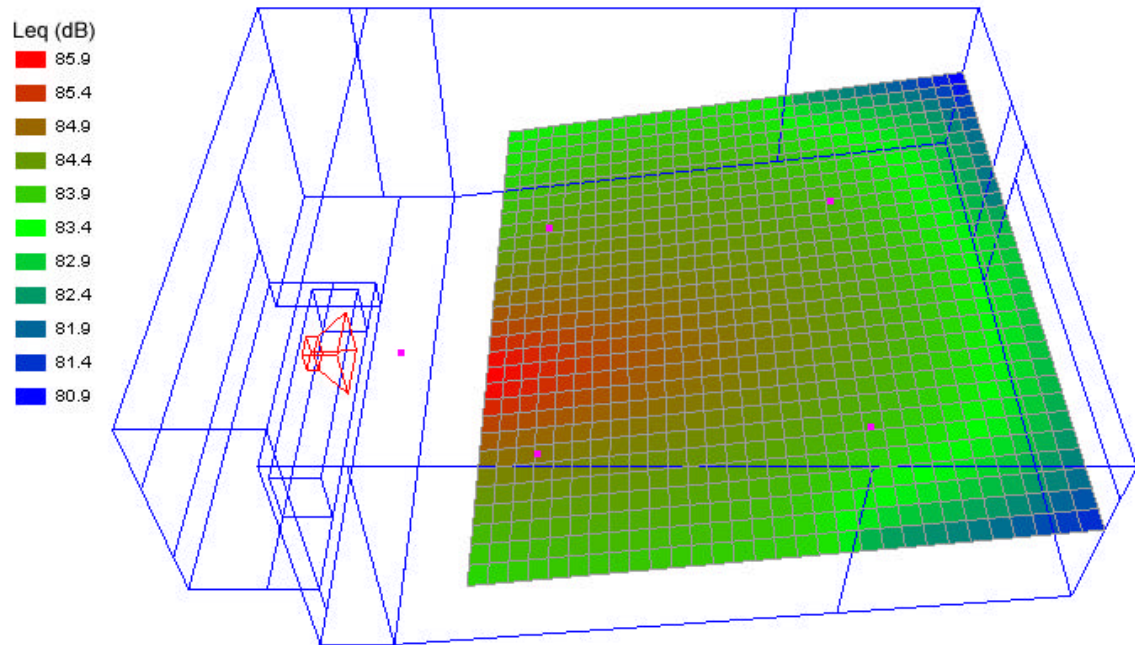


Figura 2. Distribuição de níveis sonoros

Freq= 1000Hz		P1 nome: «A»
Fim em t=0.305s		Tempo Rev. Total=0.329577s
P0 nome: «1m»	SPL=80.7dB T.rev=0.206s	SPL(A)=74.8dB(A)
P1 nome: «A»	SPL=66.8dB T.rev=0.299s	SPL(L)=84.4dB
P2 nome: «B»	SPL=68.7dB T.rev=0.284s	C35 = 5.23313
P3 nome: «C»	SPL=67.0dB T.rev=0.296s	C80 = 14.409
P4 nome: «D»	SPL=66.2dB T.rev=0.303s	SI = 21.2699
		STI = 0.889533
		AI = 0.07103
		ALcons = 0.659844

Figura 3. Excerto de um relatório do Programa COLISEO

AFERIÇÃO

Foi efectuado um programa experimental extenso com o objectivo de validar o modelo. Foram medidos e calculados vários parâmetros acústicos tais como níveis de pressão sonora e tempos de reverberação em diferentes tipos de salas (salas de aula, auditórios, salas de reuniões) no Instituto Superior Técnico. Estas salas foram modeladas com o programa COLISEO e os resultados previstos com a simulação foram comparados com medições. Em geral, foi observada uma muito boa concordância.

A figura 4 mostra comparações entre valores medidos e previstos para os tempos de reverberação em diferentes tipos de salas.



Tempos de Reverberação Simulados e Experimentais

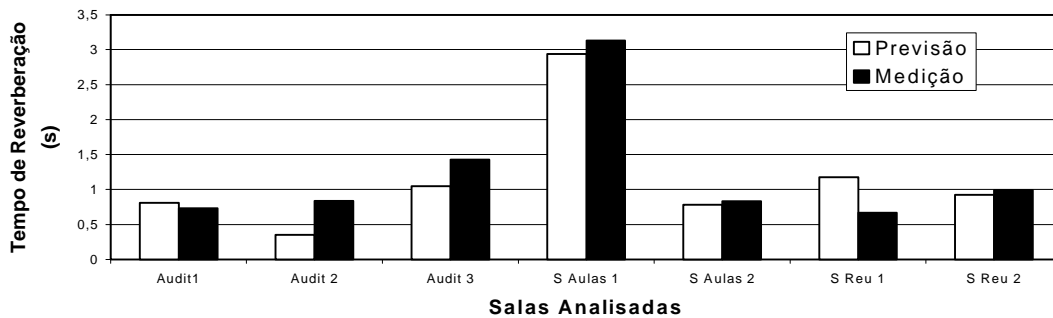


Figura 4. Comparação entre os valores medidos e simulados para tempos de reverberação em diversas salas

A figura 5 mostra a diferença entre os níveis de pressão sonora, denominada de atenuação, a 1m da fonte e num ponto receptor da audiência. Os resultados foram medidos e previstos, em diferentes bandas de frequência, em diferentes salas.

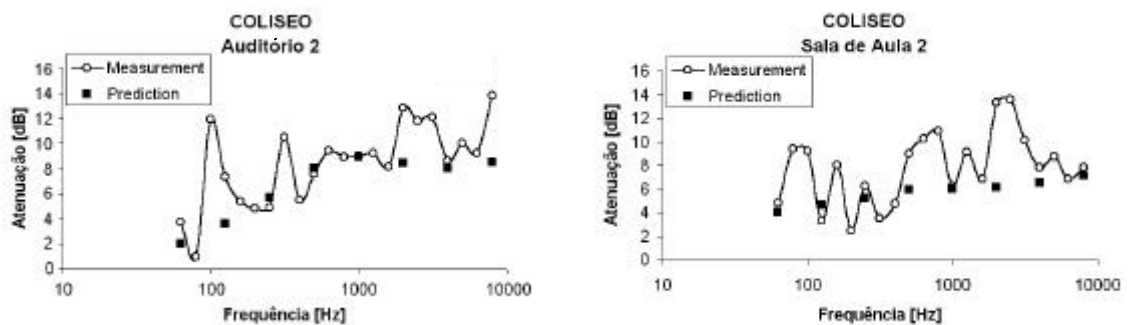


Figura 5. Comparação entre os valores de atenuação medidos e simulados

CONCLUSÕES

Foi desenvolvida e implementada em computador uma teoria previsional baseada no percurso aleatório de fonões como uma ferramenta interactiva para dimensionamento acústico de salas. Comparações entre previsões e medições em diversos tipos de salas de geometria simples ou complexa mostraram, em geral, uma muito boa concordância. Trata-se de uma ferramenta fiável, muito flexível e poderosa. O interface gráfico e a base de dados incluídos tornam o dimensionamento de salas e a simulação acústica um procedimento fácil.

O tempo de cálculo é muito menor quando comparado com técnicas previsionais baseadas em ray-tracing, para o mesmo grau de precisão. Embora a matemática seja mais complexa os cálculos são mais simples.

REFERÊNCIAS



1. H. Kuttruff, "Room Acoustics", London Applied Science (1973).
2. E. Kruzins and F. Fricke, "The prediction of sound fields in non-diffuse spaces by a random walk approach", Journal of Sound and Vibration 81 (4), 549-564 (1982).
3. H. Skudrzyk, "Über die Eigentöne von Räumen mit nichtebenen Wänden und die diffuse Schallreflexion", Akustische Zeitschrift 4, 172-186 (1939).
4. D. Alarcão, "Cálculo de parâmetros acústicos através da teoria da transição de fonões segundo um processo de Markov", CAPS/IST Report (1996) (in Portuguese).
5. J. L. Bento Coelho and D. Alarcão, "Room Acoustics Characterization Following a Phonon Transition Theory" Proc. 5th International Congress on Sound and Vibration (1997).
6. M. Barron and L-J Lee, "Energy relations in concert auditoriums I", Journal of the Acoustical Society of America 84 (2), 618-628 (1988).
7. N. Fonseca, T. Abreu, A. M. Almeida, "Fonões: previsão de Acústica de Salas em Espaços não Difusos por uma aproximação de Random Walk", IST Rep., July 1998.

