

# Sala de Espectáculos Virtual: Articulação em Tempo Real dos Ambientes Visual e Acústico

Ricardo  
Casaleiro  
DETI  
niv. e Aveiro  
a @aluno  
s.det.ua.pt

Ricardo Seco  
DETI  
niv. e Aveiro  
a @aluno  
s.det.ua.pt

Guilherme  
Campos  
DETI IEETA  
niv. e Aveiro  
agrca pos@  
det.ua.pt

Paulo Dias  
DETI IEETA  
niv. e Aveiro  
paulo.dias@  
ua.pt

Beatriz Sousa  
Santos  
DETI IEETA  
niv. e Aveiro  
bss@  
det.ua.pt

## Sumário

Utilizando as ferramentas e técnicas de visualização e computação gráfica proporcionadas pelo Visualization Toolkit (VTK), foi desenvolvida uma aplicação para visualizar, manipular e editar modelos tridimensionais (3D) de salas no formato OBJ. A aplicação permite definir, a partir de uma base de dados de materiais, as características acústicas (coeficientes de absorção) de cada superfície da sala e calcular o tempo de reverberação ( $RT_{60}$ ) em bandas de oitava pela fórmula de Millington-Sette.

Uma outra aplicação actua sobre o mesmo modelo 3D para permitir posicionar na sala fontes sonoras e um receptor – ouvinte virtual. A posição da cabeça desse ouvinte virtual segue a do utilizador, detectada através de um sensor. O som directo proveniente das fontes e suas primeiras reflexões (calculadas no modelo em causa pelo método das imagens virtuais) são processados em tempo real por filtros HRTF (head-related transfer function) seleccionados em função da orientação da cabeça do ouvinte. Isto proporciona adequadas pistas de localização espacial das fontes sonoras.

Este cálculo do campo sonoro na sala tendo em conta as suas propriedades físicas, realizado em tempo real, permite aliar à imersão visual também uma imersão auditiva do utilizador.

**Palavras-Chave:** Auralização, HRTF, Método das Imagens Virtuais, Modelos 3D, Realidade Virtual, Reverberação, VTK

## 1. INTRODUÇÃO

A realidade virtual (RV) é uma área de crescente importância, com uma gama de aplicações também ela crescente: desde jogos de computador e instalações artísticas multimédia ao estudo e divulgação do património arquitectónico e arqueológico, passando, por exemplo, pelo desenvolvimento de projectos de urbanismo, arquitectura, decoração ou promoção turística.

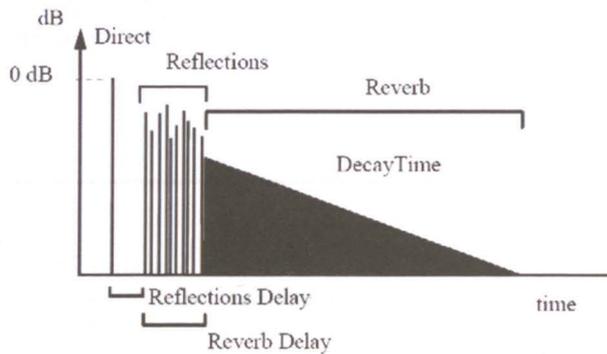
Naturalmente, os esforços para criação de ambientes de RV têm-se centrado sobretudo na vertente visual. Ora, não obstante o predomínio indiscutível da visão, a nossa percepção da realidade passa por mais quatro sentidos. A criação de ambientes virtuais cada vez mais convincentes exige que também eles sejam considerados. O mais importante – pelo menos entre aqueles que não envolvem contacto físico directo – é, sem dúvida, a audição. Este trabalho coloca ênfase precisamente na imersão auditiva, visando recriar em simultâneo, de forma articulada e em tempo real, os ambientes visual e sonoro de uma sala. Este objectivo corresponde à criação de uma *sala de espectáculos virtual*, pois o papel de um *espectador* (pelo menos na acepção tradicional do termo), não envolve qualquer uso significativo dos sentidos do tacto, paladar ou olfacto.

A recriação artificial de um ambiente sonoro é chamada *auralização*. Consiste em reproduzir (normalmente através de auscultadores) os estímulos sonoros que atingiriam os tímpanos do ouvinte se ele se encontrasse na sala que se pretende simular, para uma dada posição da(s) fonte(s) e do próprio ouvinte.

O comportamento acústico de uma sala é descrito pela sua *resposta impulsional (RIR)* – dita *binaural* no caso de se considerar um par de sinais (um para cada ouvido). A auralização baseia-se na convolução da *RIR* binaural com gravações anecóicas do som emitido pela fonte.

Existem hoje processos experimentais rigorosos para medir *in situ* a *RIR* binaural de uma sala, o que torna trivial a auralização com *RIR* medida. Porém, calcular uma *RIR* com base num modelo em tempo real (e conseguir uma auralização convincente nestas condições) é um desafio complexo. São necessários modelos simplificados que preservem a informação mais relevante do ponto de vista psico-acústico. Tipicamente, trata-se de modelos geométricos que consideram que as ondas sonoras se propagam radialmente a partir da fonte, sendo considerados apenas os fenómenos de absorção e reflexão que ocorrem quando os raios sonoros atingem as superfícies da sala. Assim, o som chega ao ouvinte em várias fases distintas. Assumindo que existe um caminho

directo desde a fonte, o ouvinte irá ouvir primeiro o **som directo**, seguido das **primeiras reflexões**, criadas em superfícies próximas. Após um tempo curto (tipicamente da ordem de algumas dezenas de milissegundos), inicia-se a denominada **cauda de reverberação**, caracterizada por um aumento exponencial da densidade das reflexões e diminuição gradual da sua intensidade (ver Figura 1).



**Figura 1 – Fases distintas da percepção do som**

A reverberação é um dos parâmetros acústicos mais importantes. Depende das dimensões e forma da sala bem como dos materiais que a compõem. Pode considerar-se independente das posições da fonte e do receptor e fornece pistas sobre as dimensões do espaço [1, 2, 3].

Este artigo descreve duas aplicações desenvolvidas para permitir a auralização num ambiente de RV/RA. Nas secções 2 e 3, é apresentada a aplicação de visualização e edição que permite manipular um modelo 3D de uma sala e calcular o seu tempo de reverberação. As secções 4 e 5 dizem respeito aos métodos e algoritmos de auralização utilizados para proporcionar ao utilizador pistas auditivas da sala. A secção 6 apresenta uma demonstração das aplicações desenvolvidas realizada num ambiente de Realidade Virtual. A finalizar, são apresentadas algumas conclusões e apontadas as principais áreas a explorar no prosseguimento futuro deste trabalho.

## 2. VISUALIZAÇÃO E EDIÇÃO DOS MODELOS

No início do trabalho, procedeu-se a uma pesquisa de *software* de simulação acústica. Por questões de carga computacional, os *packages* comerciais baseiam-se invariavelmente em modelos geométricos (*ray-tracing* e imagens virtuais). Entre os mais difundidos, destaca-se o *CATT-Acoustic* [4]. Este programa permite importar modelos de salas sob vários formatos e também criá-los de raiz através de um *script* próprio. Porém, uma vez importado ou criado o modelo, oferece poucas facilidades de edição.

Procurou-se por isso desenvolver ferramentas de edição robustas e intuitivas, que evitassem o recurso a *scripts* e possibilitassem fácil adição de elementos (ex: janelas, portas) ao modelo. A aplicação está preparada para importar modelos de salas no formato OBJ, mas seria facilmente adaptável a outros formatos. É possível especificar as características acústicas da sala (coeficientes de absorção das superfícies) de uma forma

interactiva. Esta informação é utilizada para determinar o tempo de reverberação ( $RT_{60}$ ).

### 2.1 Ambiente de desenvolvimento

A aplicação foi desenvolvida utilizando C e a biblioteca VTK (*Visualization Toolkit*) [5, 6]. Esta biblioteca disponibiliza várias ferramentas para edição e manipulação de modelos poligonais, além de permitir a sua visualização de forma rápida. Possui também importadores de vários tipos de ficheiros, nomeadamente VRML e OBJ. Após alguns testes iniciais com o formato VRML, chegou-se à conclusão que o formato OBJ simplificaria o desenvolvimento de muitas das ferramentas, nomeadamente a triangulação dos modelos, e facilitaria a importação e a conversão entre formatos.

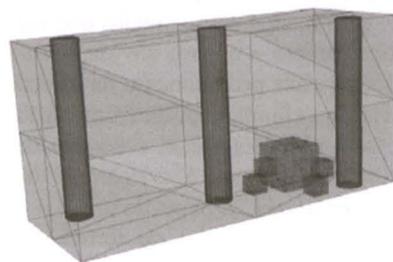
Outra facilidade do VTK é a estrutura do tipo de dados poligonal disponibilizado pela classe *vtkPolyData*. Esta classe representa geometria e topologia através de vértices, linhas e polígonos. Os polígonos são células (*cells*) às quais podem ser associados valores escalares. Usou-se esta facilidade para especificar os coeficientes de absorção dos materiais e mapeá-los com cores distintas durante a visualização. No nosso caso específico, a aplicação utiliza modelos triangulados: todas as *cells* são triângulos. Esta escolha simplifica o cálculo das áreas das diversas superfícies, necessário para determinar o tempo de reverberação.

### 2.2 Software de edição

Os modelos têm que ser fechados e triangulados. Estas condições são necessárias para garantir um cálculo correcto do volume e das áreas. O volume é calculado por um algoritmo baseado no teorema da divergência [7] disponibilizado pela função *GetVolume* da classe *vtkMassProperties*. Caso o modelo não seja fechado, o resultado obtido para volume não tem significado. Por sua vez, o cálculo da área dos triângulos utiliza o Teorema de Heron, que determina a área de um triângulo a partir da medida dos seus lados.

Na importação do modelo, é associada a cada triângulo uma cor inicial que indica a ausência de material associado.

O modo de edição mais simples utiliza um função para selecção (*picker*) que permite a selecção individual de cada triângulo do modelo (vide exemplo na Figura 2). Esta funcionalidade é fornecida pela classe *vtkCellPicker*.



**Figura 2 – Selecção individual de triângulos**

Sempre que um triângulo é seleccionado, o seu coeficiente de absorção (e consequentemente a sua cor) é actualizado de acordo com o material que se tenha decidido activar dentro de uma lista pré-definida.

Outro modo de edição, ilustrado na Figura 3, utiliza uma caixa de selecção (*BoxWidget*) disponível na classe *vtkBoxWidget*. É possível ajustar o tamanho desta caixa de forma interactiva. Isto permite seleccionar partes do modelo (ou a sua totalidade) e associar o coeficiente de absorção activo aos triângulos abrangidos pela selecção.

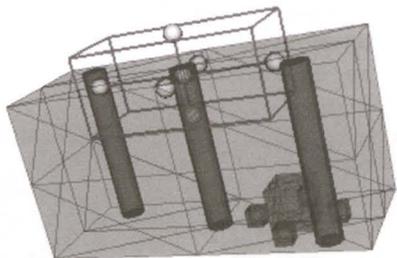


Figura 3 – Selecção com *BoxWidget*

Foi também desenvolvida uma função para aumentar o número de triângulos dos modelos a analisar (Figura 4). Esta opção permite facilmente aumentar a precisão na especificação de detalhes (ex: inserção de uma janela) em modelos inicialmente constituídos por poucos triângulos. Em contrapartida, o aumento do número de triângulos torna os modelos computacionalmente mais pesados. Estão em desenvolvimento outros métodos de selecção mais simples e eficazes (recorrendo, nomeadamente, à chamada *rubber band selection*).

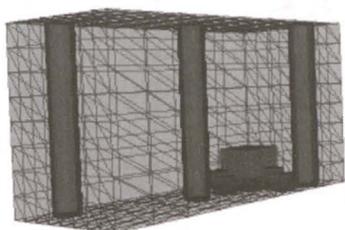


Figura 4 – Modelo re-triangulado

É possível guardar os resultados da edição em formato OBJ. A par da geometria e topologia do modelo é também armazenada a informação dos materiais, possibilitando a posterior abertura e modificação de modelos já editados.

### 2.3 Base de dados de materiais

Os coeficientes de absorção dos vários materiais encontram-se armazenados numa base de dados relacional *MySQL* [8]. Uma única tabela contém o nome do material e respectivos coeficientes de absorção (para cada material são definidos seis coeficientes correspondentes a seis bandas de frequência) [9]. Existe também um campo (ID) para definir a cor do material. Quando é seleccionado um material diferente, a aplicação comunica com a base de dados para obter a sua cor e os

coeficientes respectivos. O utilizador pode facilmente adicionar mais materiais à base de dados.

## 3. TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação ( $RT_{60}$ ) define-se como o tempo necessário para o campo sonoro numa sala decair 60 dB. É normal efectuar o cálculo em várias bandas de frequência. Tipicamente, são utilizadas seis bandas de oitava (centradas em 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz) [10].

O valor de  $RT_{60}$  mais adequado depende da utilização da sala. Por exemplo, no caso do discurso, em que o principal objectivo é a inteligibilidade, exige-se um  $RT_{60}$  curto (mas não em demasia, pois isso poderia afectar a equalização e o volume). A reverberação é também usada como efeito em estúdio; um exemplo desse uso é a remoção de inconsistências tímbricas na voz cantada.

A percentagem de energia absorvida por uma superfície quando atingida por uma onda sonora é dada pelo seu coeficiente de absorção acústica. Este coeficiente depende da frequência, o que explica a variação do  $RT_{60}$  e o seu cálculo em bandas de frequência.

### 3.1 Fórmula de cálculo

O tempo de reverberação de uma sala depende da sua forma, dimensões e materiais construtivos. Os elementos presentes na sala também têm influência, naturalmente. A primeira fórmula de cálculo do  $RT_{60}$  foi apresentada por Sabine. Esta fórmula foi depois aperfeiçoada por outros investigadores. A versão utilizada neste trabalho é a de Millington-Sette:

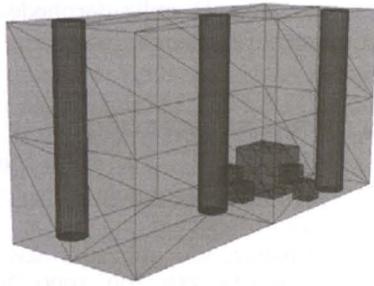
$$RT_{60} = \frac{0,161V}{-\sum_{i=1}^n S_i \ln(1 - \alpha_i)}$$

onde  $RT_{60}$  é dado em segundos (s).  $V$  é o volume total da sala ( $m^3$ );  $S_i$  representa a área da superfície coberta pelo material  $i$  ( $m^2$ ) e  $\alpha_i$  o respectivo coeficiente de absorção acústica (adimensional).

A necessidade da selecção de triângulos decorre da fórmula utilizada para calcular o  $RT_{60}$ . O uso dos coeficientes de absorção individuais de cada superfície torna esta fórmula mais rigorosa do que as que utilizam um coeficiente de absorção médio para todos os materiais. É este o caso das fórmulas em que se baseia o módulo de cálculo analítico de  $RT_{60}$  disponível no CATT-Acoustic (fórmulas de Sabine e Norris-Eyring).

### 3.2 Resultados

Um dos modelos poligonais escolhidos para testar a aplicação é apresentado na figura 5.



**Figura 5 – Modelo de teste utilizado**

Os  $RT_{60}$  deste modelo foram calculados por banda de frequência utilizando directamente a fórmula de Millington-Sette e são apresentados na Tabela 1:

f	1	0	00	1000	000	000
$RT_{60}$ s	,	1,1	0,	1,1	0,	0,

**Tabela 1 – Resultados teóricos do valor de  $RT_{60}$  do modelo de teste**

A Figura 6 apresenta os valores obtidos pela aplicação para o mesmo modelo, configurado com os mesmos coeficientes de absorção usados no cálculo teórico.

$Rt_{60}$	a	125	Hz	:	2.36
$Rt_{60}$	a	250	Hz	:	1.17
$Rt_{60}$	a	500	Hz	:	0.93
$Rt_{60}$	a	1000	Hz	:	1.17
$Rt_{60}$	a	2000	Hz	:	0.45
$Rt_{60}$	a	4000	Hz	:	0.93

**Figura 6 – Resultados fornecidos pela aplicação**

A pequena diferença (menor que 1%) observada em algumas bandas justifica-se pela consideração, no cálculo teórico, de colunas de forma perfeitamente cilíndrica, enquanto que no modelo elas são representadas por aproximações poligonais. Em testes preliminares com modelos mais simples (ex: sala cúbica), os resultados teóricos e da aplicação foram iguais.

Embora ligeiramente diferentes, pelas razões referidas no ponto anterior, os resultados obtidos com o módulo de cálculo analítico do CATT-Acoustic são muito próximos destes e consistentes em termos da sua variação em função da frequência.

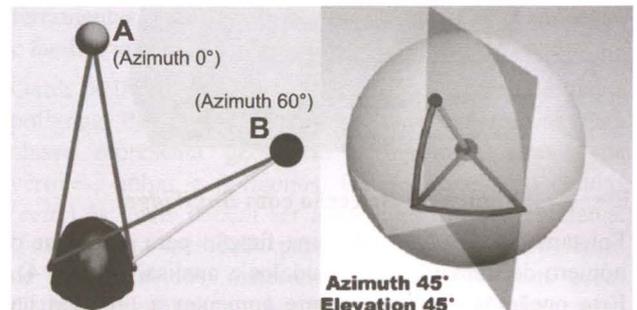
## 4. AURALIZAÇÃO

### 4.1 Filtros HRTF

A forma como as ondas sonoras chegam aos tímpanos de uma pessoa é afectada pela interacção das ondas sonoras originais com o corpo do utilizador, em particular o tronco, a cabeça e os canais dos ouvidos. O resultado dessas interacções pode ser capturado sob a forma de filtros HRTF (*Head Related Transfer Function* [1]). A complexidade da interacção das ondas sonoras com o corpo humano torna as HRTF de cada ouvido extremamente dependentes da direcção do som: por exemplo, quando a distância da fonte sonora aos dois

ouvidos é igual, as HRTF para cada ouvido são extremamente parecidas. Para distâncias diferentes, as HRTF para cada ouvido são diferentes.

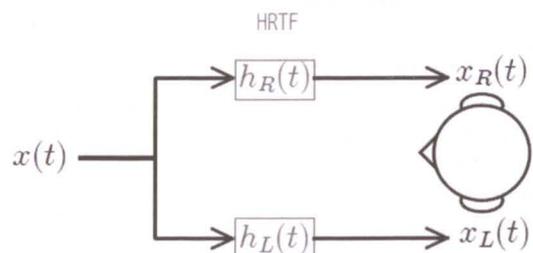
As pistas principais sobre a localização espacial do som encontram-se nas diferenças no instante de chegada (*interaural time difference* – ITD) e intensidade (*interaural intensity difference* – IID) dos sons que chegam a cada ouvido, valores esses que dependem da frequência. A posição do som em relação ao centro da cabeça é geralmente especificada pelos seguintes parâmetros (ver Figura 7): ângulo de azimute, ângulo de elevação e distância [11].



**Figura 7 – Ângulos de azimute e elevação usados nas HRTF**

### 4.2 Algoritmo de auralização

O algoritmo-base para inserir uma fonte sonora e simular a sua posição no espaço encontra-se ilustrado na figura 8. O algoritmo considera um sinal de entrada  $x(t)$  que contém as amostras de áudio que queremos espacializar. Esse sinal de entrada é duplicado para permitir aplicar as HRTF correspondentes ao ouvido esquerdo e direito,  $h_R(t)$  e  $h_L(t)$ . Os sinais  $x_R(t)$  e  $x_L(t)$ , para reprodução através de auscultadores, são o resultado da convolução entre  $x(t)$  e o referido par de HRTF [11].



**Figura 8 – Diagrama para auralização**

Dado que a aplicação deve permitir auralização em tempo real, as HRTF usadas no algoritmo [12] são actualizadas sempre que o ouvinte movimentar a cabeça.

A linguagem C não possui facilidades *standard* para *streaming* de áudio. Recorreu-se por isso à biblioteca *PortAudio*. Trata-se de uma biblioteca *open source* que corre em várias plataformas, garantindo assim portabilidade às aplicações [13].

### 4.3 Inserção de múltiplas fontes sonoras

Se existirem várias fontes no espaço é necessário repetir para cada uma o procedimento descrito anteriormente e somar todos os resultados individuais num vector de saída único. A principal limitação a este procedimento reside no elevado peso computacional da convolução.

O cálculo da convolução no domínio do tempo tem complexidade  $O(N^2)$ : a ordem,  $O$ , do algoritmo é proporcional ao quadrado do número de amostras,  $N$ . Esta circunstância limita fortemente o número de fontes que se podem processar em simultâneo. Foi possível reproduzir um número bastante maior de fontes recorrendo ao cálculo da convolução no domínio da frequência, cuja complexidade é significativamente menor:  $O(\log N)$  [14].

## 5. INCLUSÃO DE REFLEXÕES DE 1ª ORDEM

### 5.1 Método das imagens virtuais

As primeiras reflexões provêm de posições diferentes da do som directo e apresentam tempos de atraso um pouco maiores. A sua direcção é calculada pelo método das imagens virtuais (*image-source method*) [2].

Trata-se de um método geométrico, em que a onda sonora pode ser modelada como um raio que se reflecte sempre que encontra uma superfície (tal como um raio de luz se reflecte num espelho).

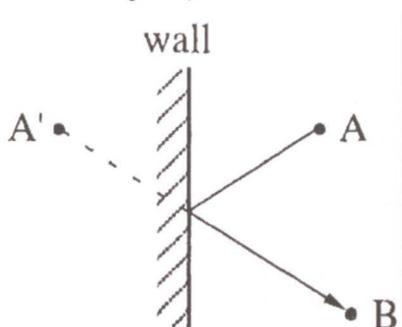


Figura 9 – Exemplo de uma fonte virtual

Na figura 9, a fonte encontra-se no ponto A e o utilizador no ponto B. Uma das formas de determinar o raio reflectido é considerar o ponto simétrico de A relativamente à superfície de reflexão. Esse ponto (A') é uma *imagem virtual* da fonte original. Neste método, cada reflexão é substituída por uma fonte virtual independente. A fonte virtual A' simula uma reflexão de 1ª ordem, pois corresponde a um raio de som com apenas uma reflexão. Nesta fase do trabalho considerámos as reflexões de ordem superior como fazendo parte da cauda de reverberação (reflexões difusas).

### 5.2 Cálculo das reflexões

Para calcular as reflexões a partir de um modelo OBJ é necessário determinar, numa primeira fase, as fontes virtuais associadas a cada triângulo. Numa segunda fase, é necessário verificar a 'visibilidade' das fontes virtuais.

Este teste de visibilidade consiste em verificar a existência da intersecção entre o segmento que une a fonte virtual ao ouvinte e o triângulo em questão. As figuras 10 e 11 mostram as reflexões obtidas em dois modelos usados para teste.

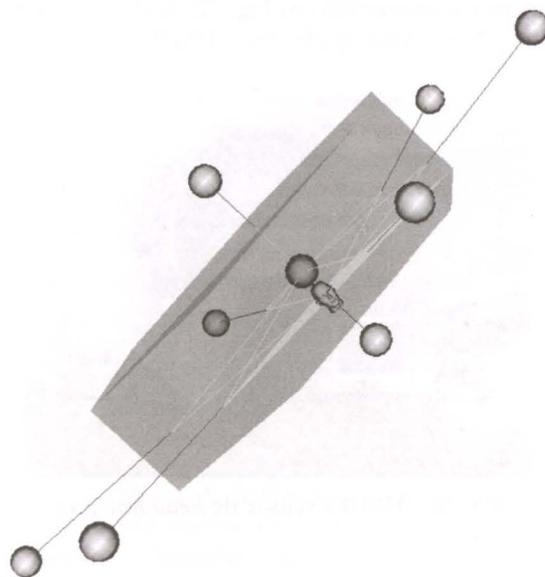


Figura 10 – Reflexões numa sala hexagonal

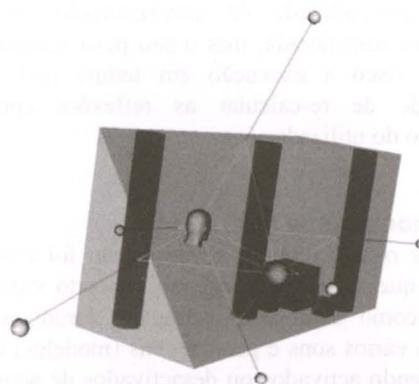


Figura 11 – Reflexões no modelo de teste

A esfera simula a fonte sonora enquanto a cabeça indica a posição do utilizador. As esferas no exterior dos modelos representam as fontes virtuais calculadas. Também se alterou nos modelos a cor dos triângulos associados às reflexões.

Em cada reflexão, a onda sonora é atenuada de acordo com o coeficiente de absorção da superfície reflectora. Se ao modelo já tiver sido associada informação acústica (ver pontos anteriores), ela é automaticamente tida em consideração.

## 6. AURALIZAÇÃO EM AMBIENTE DE RV

### 6.1 Ambiente de RV utilizado

O algoritmo de auralização desenvolvido foi testado num ambiente de RV. Este ambiente é constituído pelo equipamento apresentado na Fig. 12: óculos de realidade virtual (*Head Mounted Display* – HMD) e auscultadores estéreo.



Fig 12 – HMD e sensor de *head tracking*

A interacção com o ambiente de RV é feita através de um sensor de *head tracking* (*InterTrax*) que permite medir a rotação da cabeça tendo em conta 3 ângulos (*pitch*, *yaw* e *roll*). A possibilidade de movimentação no espaço ( , Y, ) foi considerada, mas o seu peso computacional poria em risco a execução em tempo real, dada a necessidade de re-calcular as reflexões após cada movimento do utilizador.

### 6.2 Demonstração final

Para testar o algoritmo de reverberação foi criada uma aplicação que simula um pequeno concerto virtual. Esta funciona como uma curta-metragem: foram colocadas numa sala vários sons e personagens (modelos) distintos que vão sendo activados ou desactivados de acordo com o desenrolar do espectáculo. As reflexões que cada som gera no modelo 3D são calculadas previamente. A posição da fonte é alterada tendo em conta os valores lidos pelo sensor *InterTrax*. Nesta demonstração, o utilizador mantém-se numa posição fixa, tal como aconteceria numa sala de espectáculo real, onde é possível mover livremente a cabeça mas não mudar de posição.

Na Figura 13 podemos ver a sala virtual que foi escolhida, com alguns dos modelos usados para indicar a posição das fontes sonoras. Neste caso, a actuação inclui um piano, uma bateria e um cantor, este último representado pelo rob .

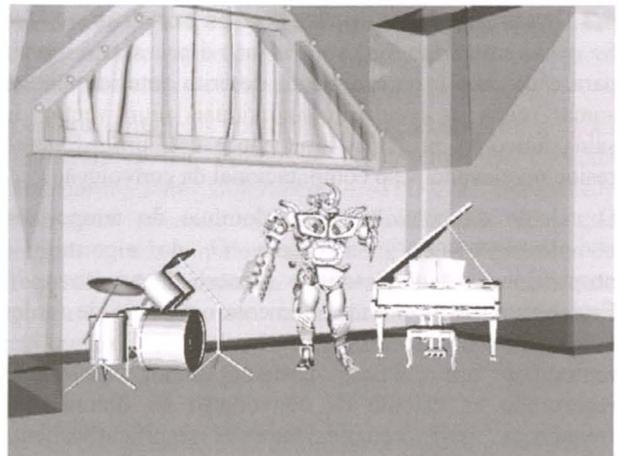


Fig. 13 – Fontes virtuais

## 7. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

A aplicação permite editar modelos de salas de forma fácil e intuitiva, oferecendo a vantagem de aceitar qualquer modelo OBJ, desde que seja fechado e triangulado.

Outra vantagem é a possibilidade de modificar facilmente as várias configurações de materiais no modelo e o cálculo rápido do  $RT_{60}$ . Isto oferece ao utilizador várias soluções para correcção da acústica num curto espaço de tempo facilitando assim o projecto ou correcção acústica de salas.

As formas de selecção e especificação de materiais no modelo provaram ser robustas. Uma possível melhoria passa pelo desenvolvimento de um *rubber band picker*. Este *picker* permitirá a selecção de triângulos através de uma área definida por arrastamento do rato.

Outra melhoria possível passa pelo alargamento do tipo de formatos aceites pela aplicação. Seria particularmente interessante o formato CAD, dado constituir um *standard de facto* na Arquitectura e Engenharia Civil.

No futuro será permitido ao utilizador ouvir de imediato o efeito de qualquer correcção acústica efectuada no modelo. Para tal está a ser desenvolvido um algoritmo de reverberação tardia baseado no tempo  $RT_{60}$  calculado.

Procurar-se-á igualmente uma forma mais eficiente de calcular as reflexões de primeira ordem, para permitir ao utilizador não só movimentar a cabeça como também deslocar-se no ambiente. Uma via possível será o recurso a paralelização.

Estão planeadas experiências com modelos mais complexos (reconstruções 3D de salas reais a partir de dados obtidos por *laser scanning*[15]), assim como testes de validação subjectiva dos algoritmos de auralização (por comparação entre o som sintetizado pelo modelo e o som registado na realidade) e de usabilidade.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Durand Begault (1994) 3-D Sound for virtual reality and multimedia'. Academic Press.
- [2] Gardner, W.G. (1998) Chapter 3. Reverberation Algorithms, in Kahrs, M. and Brandenburg, K. (eds.) Applications of Digital Signal Processing to Audio and Acoustics'. Kluwer Academic Publishers.
- [3] Luke Dahl, Jean-Marc Jot (2000) A reverberator based on absorbent all-pass filters'. *Proceedings of the COST-G6 Conference on Digital Audio Effects DAFx'00*, Verona, Italy, December 7-9.
- [4] CATT-Acoustic: Software for Room acoustic consulting and audio virtual reality.  
URL (Junho 2007): <http://www.catt.se>
- [5] W. J. Schroeder, K. M. Martin (1998 – 2<sup>nd</sup> edition) The Visualization Toolkit – An Object Oriented Approach to 3D Graphics'. Prentice Hall.
- [6] W. J. Schroeder, L. S. Avila, K. M. Martin, W. Hoffman, C. Charles Law, (2001) The Visualization Toolkit User's Guide'. Kitware, Inc.
- [7] Alyassin A.M. et al. (1994) Evaluation of new algorithms for the interactive measurement of surface area and volume'. *Med Phys* 21(6).
- [8] MySQL – Developer one  
URL (Junho 2007): <http://www.mysql.com/>
- [9] T. D. Rossing (1990) The Science of Sound'. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- [10] V. O. Knudsen, C. M. Harris (1980) Acoustical Designing in Architecture'. Acoustical Society of America.
- [11] Gary S. Kendall (1995) A 3-D Sound Primer: Directional Hearing and Stereo Reproduction', *Computer Music Journal*, 19(4), 23-46.
- [12] HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone. URL (Junho 2007):  
<http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [13] PortAudio – an Open-Source Cross-Platform Audio API. URL (Junho 2007): <http://www.portaudio.com>
- [14] Emmanuel C. Ifeachor, Barrie W. Jervis (1993) Digital Signal Processing – a Practical Approach'. Addison-Wesley.
- [15] Dias P., Matos M., Santos V., 3D Reconstruction of Real World Scenes Using a Low-Cost 3D Range Scanner . *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* Vol. 21, Issue 7, October 2006, Page 486-497.