

Simulação de Agentes com Capacidade Auditiva em Situações de Emergência

Carlos A. Cony Bryan G. da Silva Cláudio R. Jung Soraia R. Musse
Laboratório CROMOS / Mestrado em Computação Aplicada
UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos
São Leopoldo, RS, Brasil, 93022-000.

Resumo

Este artigo propõe um novo modelo de percepção auditiva para estimular o movimento de agentes virtuais em situações de emergência. No modelo proposto, uma fonte sonora (alarme) é colocada em algum local do ambiente virtual, e o decaimento da intensidade do som se dá em função da distância do agente à fonte. Quando a onda sonora atinge o agente virtual, também são levadas em consideração as diferentes sensibilidades do ouvido humano por faixas de frequência, assim como a perda natural de audição em função da faixa etária. Se o estímulo final no ouvido virtual for suficientemente forte, ou seja, pode ser ouvida, o agente reage, evacuando o ambiente conforme modelo descrito em um simulador de multidões baseado em Física.

Palavras-chave: Animação comportamental, percepção auditiva, simulação de multidões.

Contado dos autores:

{cony.carlos, spellcasterbryan}@gmail.com;
{crjung, soraiarm}@unisinis.br

1. Introdução

Com o desenvolvimento das pesquisas na área de animação comportamental, as indústrias de entretenimento, principalmente as de desenvolvimento de jogos e cinema, tem explorado a utilização de personagens virtuais. A área de simulação, em tempo real ou não, também tem encontrado na animação comportamental uma possibilidade de simular computacionalmente comportamentos complexos. Assim, quanto mais as entidades simuladas forem providas de habilidades de percepção, tais como visão e audição sintéticas, mais realistas poderão ser os resultados de suas aplicações.

Vários autores na literatura têm investigado a área de humanos virtuais [Devillers et al., 2002; Metoyer e Hodgins, 2003; Musse e Thalmann, 2001; Braun, et al. 2003; Chenney, 2004; Ashida et al. 2001], principalmente em suas aplicações em simulações comportamentais, *serious games*, ferramentas de treinamento, entre outras. Assim, humanos virtuais

perceptivos podem ser de grande interesse para as indústrias de jogos, bem como as áreas de simulação. Na verdade, o quão mais perceptivos forem os NPCs (*Non-Player Characters*) ou as entidades de uma simulação, mais inteligentes elas também poderão ser, por exemplo através da utilização de técnicas de Inteligência Artificial, como algoritmos de aprendizagem, comunicação, etc.

Este artigo apresenta um modelo matemático para prover habilidade auditiva a humanos virtuais. A principal contribuição é a possibilidade de fazer com que os humanos virtuais sejam capazes de “ouvir” sons reais (arquivo no formato *wave*, por exemplo) e perceberem de maneira individualizada, levando-se em consideração a atenuação do som em função da distância, da frequência e até mesmo pela idade atribuída ao personagem virtual. A aplicação utilizada neste artigo tem por objetivo medir a evacuação de multidões em ambientes virtuais, sendo que os humanóides apenas percebem a situação de perigo através do alarme sonoro. Este modelo é de grande importância para simulações na área de segurança, onde os resultados numéricos podem indicar problemas de planejamento ou na arquitetura do ambiente. Por exemplo, um alarme mal posicionado pode resultar no aumento de pessoas que não evacuam o ambiente por não perceberem o evento. Além disso, pode ter grande aplicabilidade em projetos arquitetônicos e de entretenimento.

Este artigo é organizado conforme segue. Na próxima seção, descrevem-se alguns trabalhos relacionados, enquanto a seção 3 descreve o modelo proposto neste trabalho. A seção 4 apresenta brevemente o simulador de emergências, no qual o modelo auditivo de humanos virtuais foi integrado. Na seção 5 apresentam-se diferentes populações simuladas e discute-se resultados obtidos, e por fim, a seção 6 disserta sobre algumas considerações finais e possibilidades de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

A inclusão de sons em ambientes virtuais é um aspecto importante para melhorar o sentido de presença e imersão [Larsson e Kleine, 2002]. Existem vários

trabalhos na literatura, relacionados com a síntese, propagação, atenuação e percepção de áudio em ambientes virtuais. Vários autores tratam especificamente da renderização de sons com múltiplas fontes geradoras de áudio. Em particular, é de especial interesse a renderização de áudio espacial baseado em exemplos (arquivos de áudio), o que infelizmente necessita de complexos modelos de processamento de sinais, mesmo para um pequeno número de fontes sonoras [Nicolas e Drettakis, 2004]. Este processamento pode incluir padrões direcionais de fontes de *rendering* [Savioja et al., 2004], áudio posicional 3D [Begault, 1994] e reverberação artificial [Gardner, 1997; Savioja et al., 2004].

A modelagem da propagação do som em ambientes virtuais muitas vezes é tratada apenas geometricamente, sem levar em consideração sua natureza ondulatória [Sousa Mafra, 2003]. Essa abordagem é conhecida como acústica geométrica e, apesar de não ser fisicamente correta, esta metodologia fornece uma simplificação razoavelmente aproximada à realidade, de maneira que análises do ambiente simulado possam ser realizadas [Kuttruff, 2000].

Uma outra linha de pesquisa relacionada com a geração e síntese de áudio diz respeito à comunicação verbal de agentes autônomos, onde eles devem ter a habilidade de “falar” e “perceber” o que os outros agentes “dizem”. Monzani e Thalmann [Monzani e Thalmann, 2000] descrevem simples métodos para propagação do som durante a conversação de agentes autônomos. A aproximação é feita através de distribuições radiais e angulares, respectivamente utilizando a distância e variação angular entre os agentes, onde as hipóteses consideradas atenuam o som se os agentes estão distantes ou se não estão de frente um para o outro.

Noser [Noser et al, 1995] trata agentes autônomos perceptivos, de maneira homogênea e sintetizam vozes, neste caso as vozes entram como input para um sofisticado modelo de animação comportamental onde reações são disparadas. Mais recentemente, Conde e Thalmann [Conde e Thalmann, 2004] apresentaram um modelo de percepção multi-sensorial para agentes autônomos, incluindo audição, além de outros sentidos. No caso da audição, esta foi implementada através de cones de percepção que filtram informação e propagam o som através de técnicas de acústica geométrica. A principal contribuição do trabalho de Conde é integrar em uma única máquina de decisões, os canais multi-sensoriais dos humanos virtuais.

Este artigo visa gerar um modelo de audição virtual para humanos virtuais que leva em consideração suas individualidades. A exemplo de Noser, este trabalho provê informação de entrada aos agentes virtuais através de arquivos de áudio, mas é especificamente focado em simulação de multidões, permitindo que se possa controlar as individualidades dos humanos virtuais.

3. Modelo de Informação Auditiva para Agentes Virtuais

Esta seção descreve o modelo apresentado neste artigo para prover audição artificial aos agentes. No modelo proposto, a percepção de cada agente leva em consideração características individuais do sistema auditivo humano, tais como, distintas sensibilidades em diferentes faixas de frequência, e as perdas auditivas que são naturais à medida que as pessoas envelhecem. É importante caracterizar que tanto a sensibilidade quanto à perda auditiva por envelhecimento não são constantes em todo espectro audível. Dessa forma, é importante analisar a distribuição espectral do som emitido, que pode ser facilmente obtida pela Transformada Rápida de Fourier (FFT).

No modelo proposto, os seguintes fatores são utilizados para avaliar a percepção auditiva, neste caso, relacionados ao áudio e ambiente virtual, e aos atributos individuais dos agentes:

Áudio e ambiente virtual:

- Extração das propriedades do som a partir de um arquivo de áudio:
 - Intensidade relativa do som por faixas de frequência.
- Propagação do som:
 - Perda de energia em relação à distância da fonte sonora.

Individualidades dos agentes:

- Curvas de capacidade auditiva de pessoas normais em diversas faixas etárias;
- Perda auditiva em relação a bandas de frequência;
- Perda auditiva em relação a problemas auditivos.

Inicialmente, um arquivo de áudio (por exemplo, um arquivo *wave*) é fornecido ao sistema, ele contém o estímulo auditivo que será inserido no ambiente. Também é fornecida a localização da fonte sonora, e a intensidade do som (em dB).¹

A sensação auditiva é caracterizada por contrações e dilatações de volumes de ar, que causam variações de pressão. À medida que as ondas sonoras se dissipam, a energia da onda é dissipada, de modo que a energia decai quando a distância à fonte aumenta. De fato, a atenuação da energia é uma função inversamente proporcional ao quadrado da distância [Halliday e

A intensidade (em dB) de um som é dada por $I_{db} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$, onde I é a intensidade do som emitido, e I_0 é a intensidade de referência, definida em termos do limiar de audição do ouvido humano.¹

Resnick, 2002], de modo que a intensidade sonora a uma distância x da fonte é dada por:

$$I(x) = A_d(x)I_e, \text{ com } A_d(x) = \frac{1}{x^2} \quad (1)$$

Onde $A_d(x)$ representa a atenuação pela distância, e I_e a intensidade emitida na fonte.

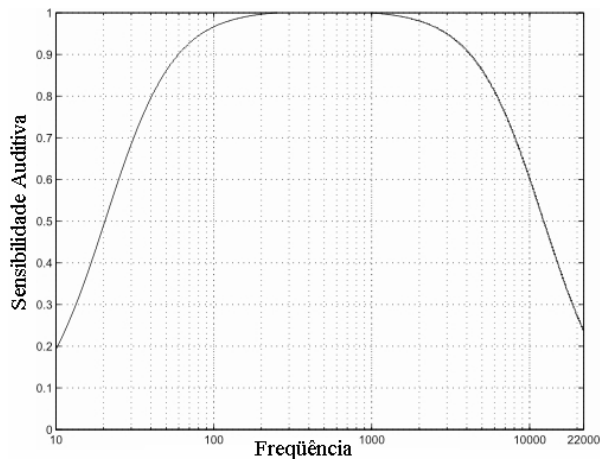


Figura 1. Gráfico da sensibilidade do ouvido humano em função da frequência

Uma pessoa situada a uma distância x da fonte sonora recebe como entrada em seu sistema auditivo um som com intensidade $I(x)$. Na verdade, essa intensidade está distribuída ao longo do espectro auditivo (aproximadamente entre 125Hz e 20kHz), e a sensibilidade do ouvido humano é diferente para cada faixa de frequência, já que existem faixas mais audíveis que outras. Por exemplo, a faixa da voz humana varia entre 60 e 1300 Hz, e é mais facilmente ouvida. Para levar em consideração essa variação de sensibilidade em função da frequência, foi utilizada a curva C de atenuação de frequência (A_f), definida pelo padrão IEC 60179 da Comissão Internacional Eletrotécnica (*International Electrotechnical Commission*), conforme equação (2):

$$A_f(f) = \frac{k_c(2\pi f)^2}{((2\pi f)^2 + 129.42^2)((2\pi f)^2 + 76655^2)}, \quad (2)$$

Onde $k_c \approx 5.91797 \times 10^9$, e f é a frequência em Hz. O gráfico da sensibilidade A_f em função da frequência é ilustrado na Figura 1 (o eixo das frequências é mostrado em escala logarítmica, para melhor visualização).

Além dessa variação de sensibilidade por frequência, há também uma perda natural de sensibilidade auditiva à medida que envelhecemos (*presbiacusia*). Tal perda de sensibilidade não é uniforme para todas as frequências, e aumenta progressivamente com a idade. Utilizou-se uma extensão do Critério de Fowler [Almeida et al., 2004],

que fornece a atenuação da sensibilidade em função da idade, em algumas frequências chaves:

$$A_i = \alpha + \beta * (idade) + \delta(idade)^2, \quad (3)$$

Onde os coeficientes α , β e δ , e são dados na Tabela 1 de acordo com a frequência em teste²

Frequência (Hz)	Coeficientes		
	α	β	δ
125	3,31	-0,262	0,0052
250	7,21	-0,483	0,0078
500	8,85	-0,594	0,0096
1000	12,36	-0,794	0,0120
2000	14,06	-0,925	0,0145
3000	12,16	-0,879	0,0157
4000	9,1	-0,747	0,0153
6000	9,11	-0,794	0,0172
8000	9,62	-0,87	0,0194

Tabela 1. Valores atribuídos aos coeficientes α , β e δ , de acordo com a frequência analisada.

Como a Tabela 1 fornece a atenuação apenas para algumas frequências, o espectro de potência de um dado som foi dividido em bandas de frequência, conforme ilustrado na Tabela 2. Todas as frequências em cada banda são atenuadas de acordo com o coeficiente de atenuação da frequência chave da banda, conforme a Tabela 1.

Bandas de frequência (Hz)
0-125
125-250
250-500
500-1000
1000-2000
2000-4000
4000-6000
6000-8000
8000-20000

Tabela 2. Bandas de Frequências

Além disso, podem-se considerar as perdas adicionais de audição devidas a fontes externas (como exposição exagerada a ambientes ruidosos). Cada indivíduo pode sofrer uma perda adicional de acordo com a Tabela 3, que é utilizada pela Previdência Social no Brasil para classificar a redução da audição da pessoa estudada.

Finalmente, quando o som chega ao ouvido do agente, ele sofre atenuações devido à distância entre a fonte e o agente, à variação na sensibilidade auditiva do ouvido humano, e às perdas esperadas de audição devido ao envelhecimento. Se a intensidade percebida

² Como pode ser observado, não se possui dados referentes a pesquisas com frequências mais altas do que 8 kHz, portanto, para estas frequências foram utilizados os mesmos coeficientes de 8 kHz.

pelo agente for maior do que um limiar T , o agente reage ao estímulo. Embora o limiar da audição corresponda a 0 dB, sons muito baixos geralmente não são percebidos pelos agentes. Neste trabalho, foi utilizado o limiar $T = 10$ dB.

O modelo proposto para percepção auditiva de um certo agente virtual pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Ler a posição do alarme, o arquivo de áudio, e a intensidade I_e do som emitido (em dB).
2. Calcular a FFT do som, obtendo o vetor $F_0(i)$
3. Com base na distância x do agente à fonte, e as perdas de audição, multiplicar o vetor $F_0(i)$, onde i representa a frequência no domínio discreto. Sucessivamente pelas atenuações A_d , A_i e A_r , levando em consideração pesos diferentes para cada frequência. O vetor resultante é chamado de $F(i)$.
4. Calcular a perda P (em dB) entre o sinal emitido e o sinal percebido, através da razão das energias

$$P = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum F_0(i)^2}{\sum F(i)^2} \right)$$

5. Acrescentar ao valor P a perda adicional para o agente em questão, conforme a Tabela 3, obtendo a perda total P_T .
6. Se $I_e - P > T$, o agente ouve o som e reage

Audição Normal	até 25dB
Redução em grau mínimo	entre 26 dB - 40 dB
Redução em grau médio	entre 41 dB - 60 dB
Redução em grau máximo	mais que 60 dB

Tabela 3. Decreto Nº 3 048 da Previdência Social de 06 de maio de 1999

4. Simulador de Multidões em Situações de Emergência

A modelagem do comportamento humano em situações de emergência possui grande aplicabilidade para simulação de situações reais. Assim, é possível que os projetos de ambientes públicos possam ser mais seguros e confortáveis para a população. Isto motiva a criação de simuladores virtuais que possibilitam a visualização das reações das pessoas em determinadas situações de risco, bem como a análise da localização de portas de emergência, extintores e alarmes.

Neste artigo, deseja-se fazer com que a simulação das situações de emergência, envolvendo multidões, tenha um comportamento mais próximo da realidade, visto que os agentes reagem a partir da percepção de sinais sonoros. Assim o objetivo deste estudo é inserir

a percepção auditiva aos agentes da multidão, que deverão reagir de acordo com os dados percebidos.

Neste simulador os agentes são representados por partículas e utilizam o modelo baseado em Física proposto por Helbing [Helbing e Moltar, 1997], descrito através de forças físicas e sócio-psicológicas a fim de descrever o comportamento humano em situações de emergência. A estes agentes, no modelo proposto, foi inserida a capacidade de audição virtual.

Nossa versão original (sem inclusão de som), todos os agentes se movem em direção a um ponto de interesse qualquer localizado no interior do ambiente em questão, até que o alarme, não auditivo - implementado através de *flags* - seja disparado e assim, todos os agentes que o percebem aumentam a sua velocidade e tendem a sair pela porta de saída. Neste modelo, o tratamento de colisões, rotas de fuga e possíveis agrupamentos entre os agentes [Braun et al., 2003] já é realizado, ficando a cargo deste novo modelo proposto, a inserção da característica de audição virtual para a percepção do alarme.

Para isso, são inseridas algumas variáveis ao simulador:

- P : Propriedades do som (retirados dos dados de entrada);
- D : Distância dos agentes a fonte emissora do alarme (calculado em tempo de execução);
- I : Idade dos agentes (definido no arquivo de configuração);
- A : Níveis de perda auditiva de cada agente (definido no arquivo de configuração).

Para medir o desempenho do modelo, é utilizada uma variável dependente N , onde N representa o número de agentes salvos na simulação, ou seja que conseguem perceber o alarme e tem potencialidade para evacuar o ambiente, conforme equação definida por (4):

$$N = f(P, D, I, A) \quad (4)$$

A configuração do simulador é realizada através de um arquivo de entrada no formato XML. Neste arquivo são passadas todas as características pertinentes à simulação, tais como:

1. Geometria do ambiente: Portas, paredes, obstáculos
2. Tipo de população
 - Distribuição dos agentes em função das reduções acústicas (conforme Tabela 3)
 - Distribuição das idades dos agentes (conforme 4)
3. Dados do Alarme:
 - Posição
 - Arquivo *wave* de entrada

Após a leitura do arquivo de entrada, os tratamentos descritos na seção 3 são executados de maneira que para cada agente é gerada uma informação de alarme percebido ou não. A partir deste processamento, o modelo funciona como proposto por [Helbing e Molnar, 1997], ou seja, gerando um atrator ou ponto de interesse nas portas de saída do ambiente para os agentes que deverão evacuar o ambiente (evento percebido), ou mantendo um ponto de interesse dentro do ambiente para agentes que não perceberam o evento.

Idades	População Jovem	População Idosa	Idade Média 55 anos
25	28	2	3
35	7	2	5
45	5	3	10
55	3	3	15
65	3	5	10
75	2	7	5
85	2	28	2
Total	50	50	50

Tabela 4. Populações Utilizadas - Idades

A próxima seção discute resultados obtidos com este modelo.

5. Resultados

Foram realizadas simulações em dois ambientes diferentes, com áreas, respectivamente iguais a $369 m^2$ e $1516 m^2$. Simulou-se apenas um alarme sendo posicionado em 3 locais distintos para avaliação: canto superior, inferior e no centro dos ambientes. Aplicaram-se três arquivos de som para o alarme, um contendo frequências na faixa da voz humana (arquivo: *voz.wave*), outro predominantemente 6 kHz (arquivo: *6kHz.wave*) e ainda um com 12 kHz (arquivo: *12kHz.wave*). O ambiente foi povoado com 50 agentes em 9 combinações possíveis de população, sendo 3 possíveis grupos de acordo com a idade (população jovem, idosa e idade média de 55 anos - Tabela 4) e 3 possíveis estados de condição auditiva (normal, média e grave - Tabela 5). Em todas as simulações, o volume do alarme na fonte foi ajustado para 100dB.

Audição	População		
	Normal	Média	Grave
Normal	70	25	10
Perda Leve	10	25	10
Perda Média	10	25	10
Perda Acentuada	10	25	70

Tabela 5. Populações Utilizadas - Perdas Auditivas

Combinando todas as possibilidades (9 populações, 3 tipos de som, 3 posições de alarme) chega-se a 81 simulações diferentes para cada ambiente, sendo que

foram executadas 10 vezes cada uma das simulações para uma melhor avaliação estatística. Assim, foram realizadas 810 simulações para cada ambiente, totalizando 1620 simulações para os 2 ambientes.

Para a menor sala observou-se que a posição do alarme não influencia significativamente nos valores percebidos pelos agentes. Portanto, serão mostrados somente os resultados do alarme no centro da sala menor, mostrando o impacto das outras atenuações.

Comparando os gráficos (figuras 4,5 e 6), para a população predominantemente saudável (em termos de perda auditiva (Tabela 5), se percebe que entre todas as faixas etárias testadas (Tabela 4), o som que apresentou a pior percepção foi aquele que possui a frequência predominantemente de 12 kHz. Já os outros dois tipos de som não apresentaram diferenças pois suas faixas de frequência são facilmente percebidas por pessoas normais.

Os resultados obtidos para a população média (Tabela 5) são apresentados no gráfico da figura 5, de onde conclui-se que a população jovem e a com média de idade igual a 55 anos (Tabela 4), apresenta resultados bem próximos aos anteriores, piorando a percepção ao som de 12 kHz. Já com os idosos, os resultados pioraram com todos os sons de entrada.

Por fim, nas simulações feitas com população com problemas graves de audição, nota-se que a queda nos valores dos indivíduos jovens continua pequena com todos os sons de entrada. Entretanto, todos os valores baixaram significativamente na população idosa, e o som de 12 kHz apresenta uma queda acentuada na população com média de idade de 55 anos com relação às simulações anteriores.

Comparando os resultados obtidos para a menor sala com a sala maior, nota-se claramente que o aumento da distância entre os agentes e o alarme ocasiona a diminuição da percepção, resultando em um número menor de pessoas salvas para os diferentes tipos de alarme, em todas as faixas etárias e problemas de audição. De fato, a comparação das figuras 4, 5 e 6 com as figuras 7, 8 e 9 indicam tal aumento do número de fatalidades na sala maior.

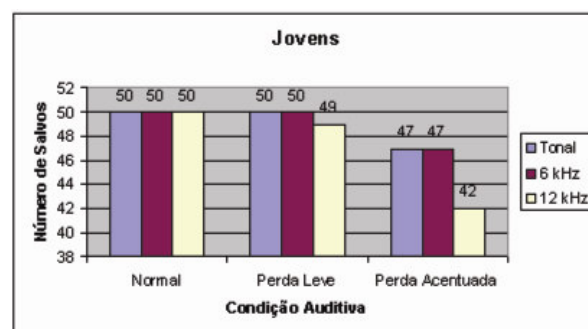


Figura 2. Menor Sala - População de jovens (tabela 4)

6. Considerações Finais

Este artigo apresentou um modelo de percepção auditiva para agentes virtuais. A aplicação realizada foi a simulação de emergência em ambientes virtuais (dois tamanhos de salas distintos) contendo 50 agentes que podem possuir diferentes idades, bem como diferentes percepções às frequências do som, e ainda possibilidades de possuir deficiências auditivas inerentes ao indivíduo.

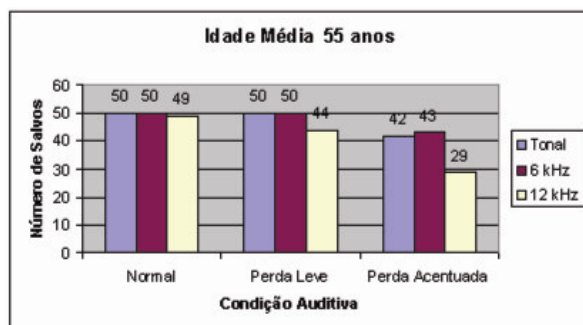


Figura 3. Menor Sala - População com idade média de 55 anos (tabela 4)

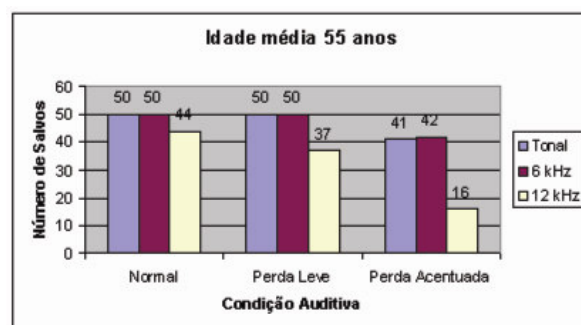


Figura 6. Maior Sala - População com idade média de 55 anos (tabela 4)

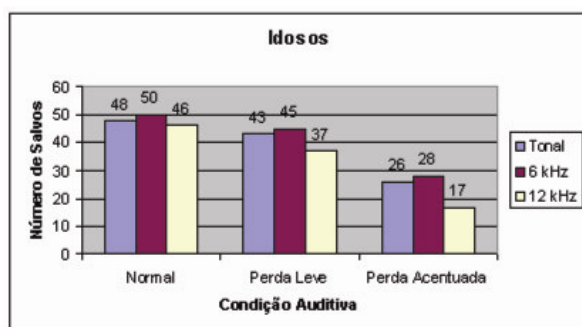


Figura 4. Menor Sala - População de idosos (tabela 4)

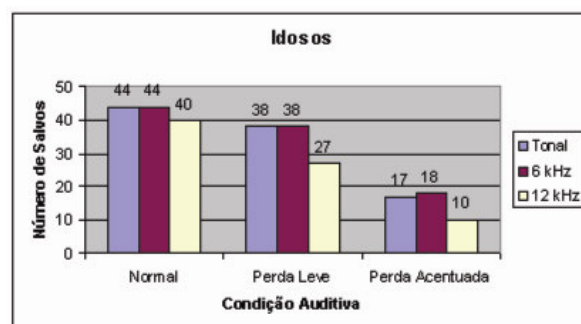


Figura 7. Maior Sala - População de idosos (tabela 4)

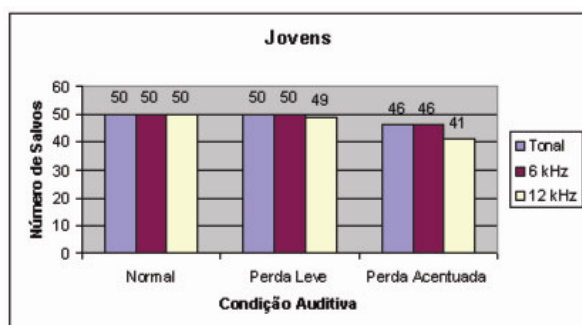


Figura 5. Maior Sala - População de jovens (tabela 4)

O simulador comprovou o esperado pelos autores, ou seja, à medida que as frequências ficam muito altas, a sensibilidade de percepção dos agentes diminui (devido à curva de sensibilidade auditiva). Isso ocorre também com pessoas mais idosas em relação às jovens, e com problemas de deficiência auditiva em relação às pessoas com percepções na faixa de normalidade.

A melhoria nos aspectos perceptivos dos humanos virtuais neste trabalho, é de extrema importância para a

simulação de multidões em situações de emergência. Sem o aspecto auditivo incluído, o modelo original, utilizando *flags* aleatórios ou apenas usando a distância em relação ao alarme, poderia simular as diferentes percepções dos indivíduos, através de métodos de acústica geométrica. No entanto, certamente o resultado não seria tão realístico e comparável à vida real. Mais ainda, simulações com áudio verdadeiro de alarmes reais podem ser simulados através deste modelo.

Como trabalhos futuros, pretende-se considerar a variação do som em relação aos obstáculos, incluindo métodos para refração, reflexão e outros fenômenos acústicos. Além disso, do ponto de vista de animação comportamental, visa-se integrar os modelos de audição artificial com visão sintética e outras percepções especializadas, como percepções de agrupamento e etc., que vem sendo desenvolvidas no contexto das nossas pesquisas.

Referências

- ALMEIDA, E. R.; CAMPOS V. A. R., GÂNDARA M. E. R., 2004. Implicações médico-legais da pair. In *Caderno de Debates da Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, page Vol.70 ed.2 56–69, Brasil, Março-Abril 2004.
- ASHIDA, K., LEE, S., ALLBECK, J., SUN, H., BADLER, N., and METAXAS, D., 2001. Pedestrians: Creating agent behaviors through statistical analysis of observation data. In *Proceedings of Computer Animation 2001*, pages 84–92, Seoul, Korea, 2001. IEEE Computer Society.

- BEGAULT, D. R., 1994. *3D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Academic Press Professional, 1994.
- BRAUN, A., 2003. Modelagem e simulação de multidões humanas em situações de emergência. Master's thesis, Unisinos University, São Leopoldo, Brazil, March 2003.
- BRAUN, A., BODMANN, B. E. J., OLIVEIRA, L. P. L., and MUSSE, S. R., 2003. Modeling individual behavior in crowd simulation. In *Proceedings of Computer Animation and Social Agents 2003*, pages 143–148, New Brunswick, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- CHENNEY, S., 2004. Flow tiles. In *Symposium on Computer Animation 2004*, pages 233–242, Grenoble, Fr., 2004. ACM and Eurographics Association.
- CONDE, T. and THALMANN, D., 2004. An artificial life environment for autonomous virtual agents with multi-sensorial and multiperceptives features. *Journal of Computer Animation and Virtual Worlds*, 15(3), Junho 2004.
- SOUZA MAFFRA, S. A. R., 2003. *Propagação de Som em Ambientes Acústicos Virtuais Bidimensionais*. Dissertação de mestrado - PUC-Rio, 2003.
- DEVILLERS, F. L. F., DONIKIAN, S. and TAILLE, J., 2002. A programming environment for behavioral animation. pages 263–274, 2002.
- GARDNER, W., 1997. *3D Sound for Virtual Reality and Multimedia*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- HALLIDAY, R. W. J., RESNICK, D., 2002. *Fundamentos de Física - Vol. 2 - Gravitação, Ondas, Termodinâmica*. Kluwer Academic Publishers, 6a Edição, 2002.
- HELBING, D., and MOLNAR, P., 1997. Self-organization phenomena in pedestrian crowds. In *Self-Organization of Complex Structures: From Individual to Collective Dynamics*, pages 569–577, London, 1997. Gordon and Breach.
- KUTTRUFF, H., 2000. *Room Acoustics*. Spon Press, Third edition, 2000.
- LARSSON, V. D., P. and KLEINE, M. 2002. Better presence and performance in virtual environments by improved binaural sound rendering. In *proceedings of the AES 22nd Intl. Conf. on virtual, synthetic and entertainment audio*, page 31–38, Espoo, Finland, June 2002.
- METOYER, R. A. and HODGINS, J., 2003. Reactive pedestrian path following from examples. In *16th International Conference on Computer Animation and Social Agents*, pages 149–156, New Brunswick, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- MONZANI, J.-S., and THALMANN, D., 2000. A sound propagation model for interagents communication. In *Proceedings of Virtual World*, Paris, France, 2000.
- MUSSE, S. R., THALMANN, D., 2001. Hierarchical model for real time simulation of virtual human crowds. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7:152–164, 2001.
- NICOLAS, E. G. and DRETTAKIS, G., 2004. Perceptual audio rendering of complex virtual environments. In *proceedings of ACM SIGGRAPH 2004*, pages 249–258, August 2004.
- NOSER, H., THALMANN, D., 1995. Synthetic vision and audition for digital actors. In *Proceedings of EG Eurographics*, pages 325–336, August 1995.
- SAVIOJA, H. J. L. T., L., VÄÄNÄNEN, R., 2004. Creating interactive virtual acoustic environments. *Journal of the Audio Engineering Society*, 47(9):675–705, September 2004.