

ESTUDO SOBRE A TÉCNICA DE AURALIZAÇÃO INTEIRAMENTE COMPUTACIONAL DE SALAS ACÚSTICAS.

Ana Paula Freitas Vilela Boaventura, apfvboaventura@mecanica.ufu.br
Marcus Antônio Viana Duarte, mvduarte@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento sobre as diferentes técnicas usadas para auralização de salas. A auralização trata-se de uma técnica capaz tornar um campo sonoro audível por modelagem física ou matemática da fonte sonora, meio de propagação e ouvintes. Com o auxílio dessa ferramenta, projetista de ambientes acústicos reverberantes, tais como salas de cinema, teatro, entre outros, serão capazes de conceber ambientes previamente otimizados, levando em consideração a qualidade dos parâmetros necessários para cada situação. Assim sendo, será feita uma abordagem sobre os quatro métodos básicos de auralização de salas, dando maior enfoque na Auralização Inteiramente Computacional, que tem sido mais difundida atualmente. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, mostrando a eficiência da técnica para o projeto acústico de salas.

Palavras-chave: Auralização, Acústica de Salas, Modelagem Computacional.

1. INTRODUÇÃO

No projeto de salas acústicas o gargalo concentra-se na dificuldade em conceber projetos com qualidade acústica. Isso porque há uma tênue linha que separa os parâmetros de qualidade para cada recinto, em outras palavras, para uma sala de aula espera-se que haja uma boa inteligibilidade, enquanto que para uma sala de concerto, um bom preenchimento. Com o auxílio da auralização é possível criar e reproduzir áudio em ambientes acústicos, incluindo as salas virtuais.

A auralização trata-se de uma técnica para criação de arquivos sonoros audíveis a partir de dados simulados, medidos ou sintetizados, Volander (2008). Esta palavra é análoga à visualização, no que se refere à capacidade de “antevisão” da acústica de um ambiente sem que se esteja nele ou sequer que ele exista, Klener (1993). O objetivo desta tecnologia é recriar a impressão aural das características acústicas de um espaço, seja ele fechado ou aberto. De forma sucinta, o processo de auralização de salas acústicas inicia-se pela obtenção da Resposta Impulsiva da Sala – RIR (*Room Impulse Response*), que pode ser captada por modelos acústicos em escala ou modelagem computacional, Lokki e Savioja, (2005). Posteriormente, com uma convolução entre a RIR e um sinal anecóico (sinal desprovido de distorções do ambiente) é possível obter a assinatura acústica do ambiente.

Historicamente, as pesquisas em auralização começaram na primeira metade do século passado, quando Spandock e equipe tentaram modelar uma sala para aferir a performance da fala e música em modelos de escala reduzidos. Primeiramente usaram modelos físicos em escala de 1:5 e posteriormente em escala de 1:10. Na ocasião eles usaram um método denominado gramofone, Fernandes Júnior (2005). Primeiramente, um sinal anecóico era gravado num cilindro de cera e este então, era reproduzido no modelo, por intermédio de um alto-falante, com a velocidade de reprodução ajustada para um valor 5 vezes maior que a de gravação, pois a escala de redução era de 1:5. O som, no modelo era captado com a mesma velocidade de rotação que foi inserido e era registrado num outro cilindro. Usando fones de ouvido, os pesquisadores poderiam ouvir o som do espaço modelado com o cilindro de cera girando à sua velocidade normal de reprodução, ou seja, 5 vezes mais lenta para obter a impressão do evento auditivo. Como resultado, a inteligibilidade da fala foi comparada entre o modelo de escala e a sala real.

Com o avanço da eletrônica e da computação, surgiram os métodos de levantamento da resposta impulsiva puramente digital, com o emprego de fontes virtuais e técnicas geométricas para propagação do som pelo ambiente. No final dos anos 80, foi realizada uma das primeiras tentativas de modelagem acústica de ambientes para simulação binaural de salas de concerto, ou seja, auralização, Vian e Martin, (1992).

A grande vantagem desse método consiste no emprego de técnicas previsionais para simulação do ambiente, estimando o campo sonoro do recinto após uma excitação arbitrária. Assim sendo, é possível, ainda na etapa de projeto, propor mudanças na análise, seja com tratamentos acústicos ou mesmo simples mudanças de layout. Como principais preocupações da metodologia, concentram-se a fidelidade sonora, diretividade e a captura das características acústicas do local.

Este trabalho está dividido em cinco itens, sendo esse o primeiro deles, com uma breve introdução sobre o assunto. O segundo tópico, apresenta a cadeia de auralização e os componentes necessários para fazer a auralização de salas

acústicas. Diferentes técnicas de auralização são discutidas no terceiro item. No quarto tópico é apresentado a Auralização Inteiramente Computacional, mostrando os detalhes da metodologia e ao final alguns resultados preliminares são apresentados, bem como uma discussão sobre os mesmos.

2. CADEIA DE AURALIZAÇÃO

O processo de auralização é caracterizado por um encadeamento básico denominado cadeia de auralização, assim como mostra a Fig. (1):

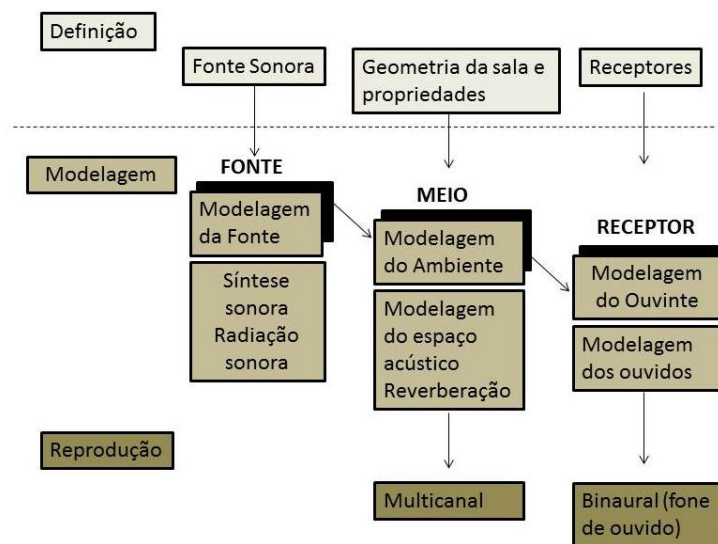


Figura 1. Cadeia de auralização: Modelagem da fonte-meio-receptor para auralização. Figura modificada de Savioja e Lokki, (2002).

Uma típica cadeia de auralização é composta por um sistema de comunicação fonte-meio-receptor. A figura acima representa a auralização binaural, responsável por captar RIR em pontos distintos, cuja distância é proporcional à distância entre as duas orelhas dos seres humanos, ou seja, a Resposta ao Impulso Binaural – BRIR (*Binaural Impulse Response*).

Do esquema acima, a fonte é o dispositivo responsável por inserir energia no sistema, Savioja (2000). Geralmente é expressa em função do nível de potência e da diretividade, que sofrem influência da banda de frequência. Devido à capacidade de radiar energia isotropicamente, as fontes do tipo pontuais são muito difundidas nos processos de auralização.

O meio de propagação é responsável por extrair as características do ambiente sonoro no tempo e no espaço. Particularmente, para um meio fechado ou semi-fechado, ocorre o princípio da reverberação, devido às várias reflexões que ocorrem com o som, enriquecendo o sinal que alcança o ponto receptor, Hodgson (1990). Há muitos algoritmos que permitem a simulação do campo reverberante de um ambiente submetido à resposta impulsiva. Matematicamente, a propagação sonora é descrita pela Equação da Onda ou Equação de Helmholtz, e maiores detalhes sobre a sua formulação está disponível em Gerges (2000), Blackstock (2000) e Bistafa (2006).

Os receptores, assim como a fonte, sofrem influência do seu posicionamento no recinto, interferindo na informação que neles chegam. Isso ocorre em virtude da frequência do sinal, em outras palavras, devido à variação do comprimento de onda. Além disso, com a distância que o som tem que viajar (entre a fonte e receptor) ou a presença de obstáculos, pode ocorrer o mascaramento sonoro. Quanto à característica aural, é possível classificar os receptores como binaural (fones de ouvido) e transaural (auto-falantes), Figueiredo, (2005).

3. TÉCNICAS DE AURALIZAÇÃO

A auralização é o resultado de uma longa cadeia de modelagem, considerações, aproximações e cálculos, Rindel, (2004). Porém, é possível distinguir quatro métodos, que são caracterizados pela representação da fonte, meio e receptor. Na Tabela 1 são apresentadas as quatro técnicas de auralização de salas.

Tabela 1. Técnicas de Auralização.

Auralização	Descrição
Inteiramente Computacional	A fonte, a transmissão sonora e as propriedades acústicas do local em estudo são modeladas em ambiente virtual. O cálculo da RIR e, conseqüentemente, a BRIR é obtida computacionalmente. A ambiência pode ser percebida por intermédio da convolução feita pela BRIR e outro sinal anecóico. A apresentação deste resultado é feita utilizando sistemas binaurais, via fones de ouvido ou transaurais (reprodução via alto-falantes com processamento adequado).
Computacional com Múltiplos Alto-Falantes	Tal como o modelo Inteiramente Computacional, a definição da fonte, meio de propagação e receptor, bem como a aquisição da RIR é feita virtualmente. Porém, a diferença concentra-se na etapa de convolução, que para este caso é multi-canal permitindo, assim, uma direcionalidade mais natural alcançando o ouvinte.
Indireta por Modelo Acústico em Escala	Essa técnica utiliza modelos acústicos em escala e técnicas ultrassônicas para medir a BRIR de um determinado ambiente. Assim, a convolução desta resposta impulsiva com o sinal de interesse pode ser feita como na auralização inteiramente computacional.
Direta por Modelo Acústico em Escala	Este método difere do anterior pelo fato da convolução ocorrer em tempo real. O sinal desejado, devidamente escalonado, é executado no modelo. Posteriormente, é captado e convertido novamente para a escala normal, para armazenagem da BRIR.

Já no início dos anos 90, Kliner (1993) apontava a tendência em usar a auralização inteiramente computacional em detrimento as demais, devido à flexibilidade, em outras palavras, passível de mudanças no que se refere às características da fonte, do receptor e principalmente na geometria e nos parâmetros do ambiente.

4. AURALIZAÇÃO INTEIRAMENTE COMPUTACIONAL

Assim como apresentado na Tabela [1], na auralização inteiramente computacional, todos os componentes envolvidos no processo são modelados computacionalmente para construir um ambiente acústico virtual. Dessa forma a RIR emitida pela fonte é calculada e são feitas as medidas BRIR simulando o receptor, com o intuito de reproduzir a sensação auditiva do ouvido esquerdo e direito, reconstituindo as diferenças causadas pela incidência de um campo acústico sobre o ouvinte Gomes, Bertoli, e Dedecca, (2007). Posteriormente, os sinais da BRIR são convoluídos com o sinal anecóico desejado.

Para a simulação da propagação sonora, muitos algoritmos previsionais são disponíveis. Os modelos estatísticos não são adequados para auralização, porque não conseguem captar com precisão a energia sonora nos pontos receptores. Os mais difundidos na literatura são os baseados na geometria, como por exemplo, Ray Tracing, Image Source. Numa tentativa de obter resultados mais próximos da realidade, esse trabalho faz uso da Malha de Guias Digitais de Ondas para obter a RIR, maiores detalhes sobre formulação do algoritmo estão presentes em: Campos, (2006), Moura (2005) Murphy e Mullen, (2002) e Smith, (1992).

4.1. Modelagem da Fonte

Através do uso da Malha de Guias Digitais de Ondas é possível representar a fonte, meio de propagação e receptores. Para a modelagem de fontes, um ponto qualquer da malha é adotado e uma excitação é gerada para reproduzir a injeção de energia sonora Smith, (1992). Para este trabalho, uma fonte sonora é simulada por injeção de um sinal senoidal, em um único nó, implementando assim, uma fonte pontual.

Particularmente, os sistemas acústicos de transmissão sonora podem ser aproximados por Sistemas Lineares Invariantes no Tempo (SLIT). A grande vantagem é que sistemas assim classificados podem ser caracterizados através da resposta impulsiva, que por sua vez, permite inferir na interação das ondas sonoras com os obstáculos e computando quais as mudanças que este processo impelirá a este campo sonoro em um dado ponto do espaço em estudo, Volander, (2008).

Uma maneira de se obter uma resposta impulsiva é através de uma aproximação da função Delta de Diract. Num experimento numérico é possível injetar energia no sistema através de um sinal do tipo tom puro, através de uma meia onda, que é uma abordagem feita neste trabalho.

4.2. Modelagem do Meio de Propagação

Para uma análise bidimensional, foi adotada a malha quadrada SWG (Square Waveguide Mesh) em virtude da simplicidade. A pressão sonora nas juntas de dispersão, pontos em que as guias se interconectam, é calculada pela diferença de pressão sonora dos nós vizinhos P_i no instante anterior ($n-1$) e a pressão sonora da própria junta de dispersão P_j no tempo $n-2$, conforme mostra a Eq.(1):

$$P_j(n) = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^4 P_i(n-1) \right] - P_j(n-2) \quad (1)$$

A distância entre os nós Δx é determinada pela frequência de atualização f_s , velocidade de propagação do som no meio c e o número de direções da malha, $N=2$ para SWG e é obtido por:

$$f_s = \frac{c\sqrt{N}}{\Delta x} \quad (2)$$

Na região de contorno, a relação entre os coeficientes de absorção é dada pela Eq. (3), onde r é o valor de reflexão, que varia entre 0 e 1.

$$P_j = (1-r)P_i^+ \quad (3)$$

4.3. Modelagem dos Receptores

A BRIR pode ser considerada como uma assinatura da resposta impulsiva para uma fonte sonora particular e um receptor humanonaural Klener, (1993) e para Rindel e Christensen (2009) o cálculo da mesma é o ponto chave da auralização. Segundo Fernandes Júnior, (2005) é possível fazer simplificações no modelo com o intuito de obter ao menos as diferenças interaurais.

Klener, (1993) num trabalho vastamente explorado, apresenta algumas maneiras de pós-processar a RIR para obter o efeito binaural necessário. Um dos exemplos citados em seu trabalho consiste na representação estérea através de dois canais para captar a função transferência da pressão sonora no ambiente ($H1$ e $H2$), sendo os pontos receptores ($r1$ e $r2$) alocados em distância inteaural, como mostrado na Fig. [2]. Além disso, o autor acrescenta que é possível obter a resposta binaural mais rapidamente ao usar como pontos receptores aproximações de esfera, ao invés de verdadeiros modelos de função transferência da cabeça para o ouvido.

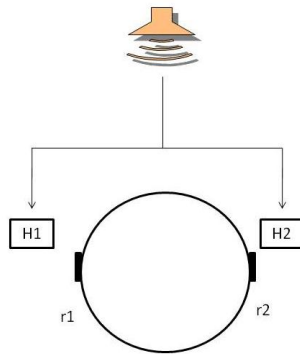


Figura 2. Recepção do áudio usando a técnica BRIR.

Numa compilação de informações, Rindel e Christensen, (2009) apontam os passos necessários para criar e usar a BRIR. Na sequência, serão apresentados os passos seguidos para obter a BRIR utilizada neste trabalho.

- Cada canal captado (direito e esquerdo) é captado pelos dois receptores simultaneamente;
- São simuladas 6 bandas de frequência, sendo que cada banda, o sinal sofre atenuação de acordo com o coeficiente de absorção;
- Todas as seis bandas são filtradas individualmente e posteriormente superpostas numa representação binaural.

4.4. Convolução para auralização

Devido à condição de sistema linear, é possível aplicar o princípio da superposição e obter a resposta total à série de impulsos infinitesimais ocorrendo de $t = 0$ até $t = dt$. Através da convolução diretamente no tempo, pela integral de Duhamel, o sinal da resposta impulsiva binaural do ambiente (BRIR) é convoluido com o sinal seco ($s(t)$), de característica anecóica. Onde:

$$x(t) = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau)d\tau = f(t) * g(t) = BRIR * s(t) \quad (4)$$

Nesse caso $x(t)$ é o sinal resultante da convolução que carrega todas as informações da fonte, do ambiente e do ouvinte. Lokki (2008) discute a qualidade dos sinais anecóicos e faz uma abordagem quanto ao emprego de sinais provenientes de uma orquestra sinfônica.

A partir destes sinais o resultado da auralização pode ser avaliado por intermédio da técnica binaural (fones de ouvido) ou através da técnica transaural (reprodução em câmaras anecóicas com um par de alto-falantes contendo, em sua entrada, filtros de cancelamento crosstalk), Fernandes Júnior, (2005).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na análise que segue, alguns parâmetros foram configurados para simular as variáveis do mundo real, tais como tamanho da sala, localização da fonte e dos receptores, bem como os coeficientes de absorção. Dessa forma, uma sala bidimensional de 7×4 [m] foi simulada com a malha do tipo SWG. O modelo foi submetido a uma resposta impulsiva, cuja fonte situada no ponto (3,3) e o par receptor, usado para captar as informações binaurais, situa-se em (6.5, 3.50) e (6.5,3.65), respectivamente. A Figura (3.A) mostra o esquema do problema físico, juntamente com o esquema da malha adorado. A Figura (3.B) mostra o zoom do sinal de excitação do sistema, captado na fonte:

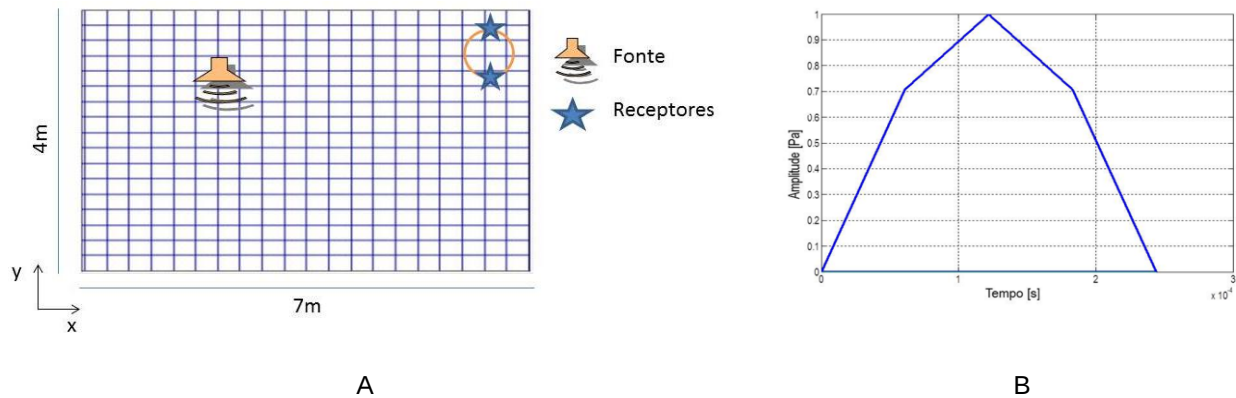


Figura 3. (A) Representação do modelo físico e a malha quadrada. (B) Sinal de excitação do sistema

Conforme é possível observar, na Figura (3 B), o sinal de entrada para o sistema trata-se de uma aproximação da função Delta de Dirac, representado por uma meia onda com frequência de 4096Hz, amplitude de 1Pa e tempo de ativação na ordem de 2.44×10^{-4} s.

Para a concatenação das guias, com o intuito de criar a malha, a distância entre os nós foi estabelecida de acordo com a Eq. (2), sendo que a velocidade de propagação do meio foi ajustada em 342ms, número de direções da malha ($N=2$) e f_s de 4×4096 Hz. Com a finalidade de criar uma situação mais próxima da realidade, os coeficientes de absorção foram variados segundo as bandas de frequência de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000Hz, durante o tempo de 2s, captando o sinal direto e as primeiras reverberações. A cada simulação, os quatro obstáculos foram projetados para representar o mesmo material, em outras palavras, com o mesmo coeficiente de absorção. Os valores de absorção em bandas de frequência são: 5, 10, 12, 15, 17 e 20.

A Figura (4) mostra os sinais obtidos num ponto receptor em três bandas de frequências diferentes. Conforme o esperado, o sinal fica mais atenuado em frequências mais altas, devido ao alto coeficiente de absorção, imposto no sistema. Nessa figura os sinais já estão filtrados por um filtro do tipo butterworth de quarta ordem, através da função butter do Matlab. A grande vantagem desse tipo de filtro é apresentar uma resposta muito plana na banda passante e por se aproximar de zero, nas demais bandas.

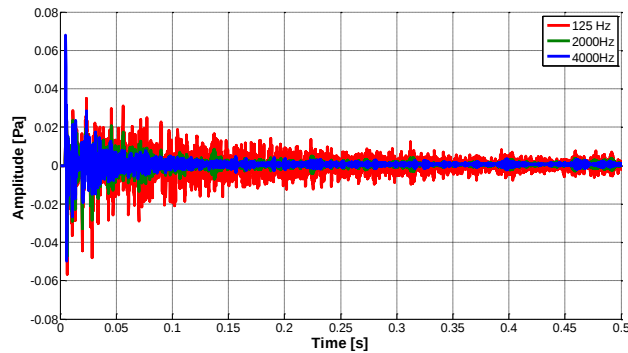


Figura 4: Três bandas de frequência filtradas através do filtro do tipo butterworth.

O procedimento de cálculo da RIR foi calculado seis vezes, variando os coeficientes de absorção, para representar diferentes banda de frequência. Cada sinal foi filtrado em filtros de bandas de oitava e a soma das componentes filtradas foram convoluídas com outros sinais de áudio, representado na Fig.(5) como sinal original e o resultado da convolução é mostrada na sequência.

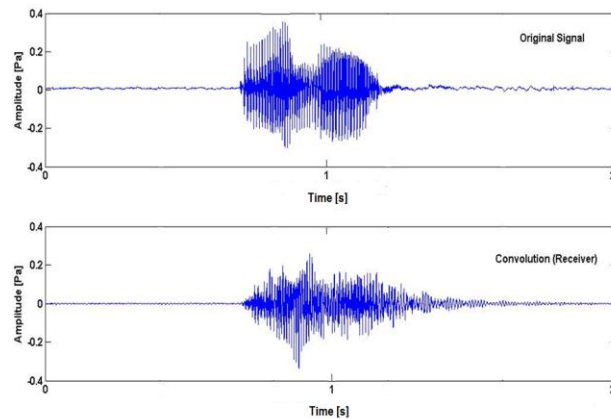


Figura 5: Sinal Original e convoluído, respectivamente.

O presente trabalho se propôs a investigar as técnicas de auralização, com interesse especial na auralização inteiramente computacional, que com o auxílio de técnicas numéricas consegue prever o comportamento sonoro dentro de um ambiente virtual. A grande vantagem desse tipo de trabalho é conseguir, durante a etapa de projeto, otimizar o sistema, seja através da remodelagem na geometria do recinto ou mesmo propor o uso de materiais acústicos específicos, cujo coeficiente de absorção atenda os requisitos necessários da obra.

Como método de acústica previewal, foi utilizado a Malha de Guias Digitais de Ondas, uma técnica relativamente recente, e baseada no comportamento da onda. A grande vantagem dessa metodologia está na capacidade de simular processos físicos intrínsecos da propagação sonora, tais como: transmissão, reflexão e difração. Ao adotar a malha SWG, obtiveram-se alguns resultados preliminares. Porém, ao ouvir o arquivo sonoro é possível constatar alguns ruídos, provavelmente, devido à falha da geometria da malha, que é quadrada, em captar com exatidão a propagação sonora, que ocorre de forma esférica. Uma solução, seria o uso de outras geometrias de malhas, como a triangular, por exemplo.

Outra grande contribuição desse trabalho foi inserção na malha de um sinal do tipo Delta de Dirac na fonte e calcular a Resposta Impulsiva da Sala (RIR). Uma vez que um sistema acústico pode ser classificado como Sistema Linear Invariante no Tempo (SLIT), é possível caracterizar o ambiente através dessa resposta e extrair parâmetros acústicos tais como tempo de reverberação, clareza, inteligibilidade, entre outros. Quanto à modelagem da fonte, ainda é possível acrescentar que captando a Binaural Room Response Impulse (BRIR), representado pela distância interaural dos pares receptores, representando os ouvidos direito e esquerdo, respectivamente e filtrando cada sinal em bandas de frequência, com o auxílio do filtro butterworth, através de uma rotina do programa comercial Matlab, foi possível calcular o sinal que chega nos dois pontos receptores, através do somatório das componentes em bandas de frequência.

Enfim o processo de auralização se deu através do procedimento matemático de convolução entre o sinal BRIR e outro sinal anecóico. Como resultado foi apresentado o comportamento sonoro desse sinal no ambiente virtual, como se o sinal tivesse sido produzido dentro da própria sala.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica e a CAPES.

7. REFERÊNCIAS

- BISTAFA, R. (2006). *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. São Paulo.
- BLACKSTOCK, D. (2000). *Fundamentals of Physical Acoustics*. USA: J.Wiley.
- CAMPOS, G. (2006). Modelação Acústica 3D por Malhas de Guias de Ondas Digitais. *Associação Portuguesa de Engenharia de Áudio*.
- FERNANDES JÚNIOR, A. C. (2005). *Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais*. Campinas - SP: Dissertação apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Universidade Estadual de Campinas. .
- FIGUEIREDO, F. L. (2005). *Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música*. São Paulo: Dissertação apresentada à Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo.
- GERGES, S. N. (2000). *Ruído: Fundamentos e Controle*. Florianópolis, SC: NR Editora.
- GOMES, M. H., BERTOLI, S., & DEDECCA, J. (2007). Implementação de métodos para a simulação acústica e auralização de salas. *SOBRAC*, 12-25.
- HODGSON, (1990). On the accuracy of models for predicting sound propagation in fitted rooms. *J. Acoustic Soc. America*, 88 (2), August, 871-877.
- KLENER, M. A. (1993). Auralization - An Overview. *J. Audio Eng. Soc. Vol.41 No.11*, pp. 861-876.
- LOKKI, T. (2008). Diffuse and Intensity Analysis of Spatial Impulse Responses. *Acoustics 08*, pp. 6495-6500.
- LOKKI, T e SAVIOJA, L. (2005). Evaluation of Auralization Results. *ForumAcusticum*.
- MOURA, H. G. (2005). Simulação da Propagação de Ondas Acústicas Através de uma Malha de Guias Digitais de Ondas. *Dissertação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia, MG, Brasil.
- MURPHY, D., & MULLEN, J. (2002). Digital Waveguide Mesh Modelling of Room Acoustics: Improved Anechoic Boundaries. *Proc. of the 5 Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFX-02)*. Hamburg, Germany.
- RINDEL, J.H. (2004). Evaluation of room acousitc qualities and defects by use of auralization. *148th Meeting of the Acoustical Society of America*.
- RINDEL, J. H., e CHRISTENSEN, C. L. (2009). Auralisation of a symphony orchestra with odeon - the chain from musical instruments to the eardrums. *Proc. of the EAA Symposium on Auralization* (pp. June 15-17). Espoo: Finland.
- SAVIOJA, L. (2000). *Modeling Techniques for Virtual Acoustics*.
- SAVIOJA e LOKKI, (2002). Interactive room acoustic rendering in real time. *IEEE*, pp. 497-500.
- SMITH, J. (1992). Physical Modeling with Digital Waveguides. *Center of Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA)*. Stanford University, USA: CA 94305.
- VIAN, J., e MARTIN, J. (1992). Binaural room acoustics simulation: Practical uses and applications. *Applied Acoustic*, 293-305.
- VOLANDER, M. (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Germany: Springer.