

# Estimadores de Qualidade para Pequenas Salas Destinadas a Atividades Musicais

Yang Yili<sup>1</sup>, Flávio Soares Corrêa da Silva<sup>1</sup>, Fernando Iazzetta<sup>2</sup>, Fábio Kon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação - Instituto de Matemática e Estatística

<sup>2</sup>Departamento de Música - Escola de Comunicações e Artes

Universidade de São Paulo (USP)

[yili@linux.ime.usp.br](mailto:yili@linux.ime.usp.br), [fcs@ime.usp.br](mailto:fcs@ime.usp.br), [iazzetta@usp.br](mailto:iazzetta@usp.br), [kon@ime.usp.br](mailto:kon@ime.usp.br)

**Abstract.** *In this article we present a work-in-progress report on the development of a toolbox to assess the acoustical features of environments such as music halls, lecture theatres, etc. for the specific use of music appreciation. Our toolbox shall be comprised by special-purpose equipment to measure and/or estimate relevant physical parameters, together with software tools to extract useful information from the obtained measures and estimates, to simulate the results of intervening on the physical properties of environments (e.g. by changing the geometry of a theatre), and to propose actions that optimize the values of the parameters under consideration.*

**Resumo.** *Nesse trabalho apresentamos os resultados iniciais de um projeto em andamento, que tem por objetivo construir ferramentas para a avaliação das características acústicas de ambientes, como por exemplo salas de concerto e anfiteatros, com relação ao uso específico de caráter musical. As ferramentas devem incluir equipamento para medir e/ou estimar os parâmetros físicos relevantes, bem como software para extrair informações úteis a partir das medidas e estimações efetuadas, para simular o resultado das modificações de propriedades físicas dos ambientes (por exemplo alterando a geometria de uma sala), e para propor ações que otimizem os valores dos parâmetros considerados.*

**Palavras-chave.** *Modelos acústicos, acústica de sala, simulação acústica.*

## 1. Introdução

Recentemente, a área denominada *acústica de salas* está ganhando notoriedade em função da demanda pela realização de projetos de estúdios de gravação, *home-theatres*, cinemas, teatros e salas de concerto. A disponibilidade de recursos e técnicas para efetuar bons projetos no que se refere à acústica tem colocado em evidência a importância do controle e tratamento do comportamento acústico em ambientes com funções diversas, como por exemplo salas destinadas a acomodar restaurantes, agências bancárias, auditórios e salas de aula. Algumas empresas têm se estabelecido no Brasil para suprir a demanda por técnicas e métodos para otimização dos atributos acústicos de salas, porém sua atuação baseia-se quase sempre no uso de soluções tecnológicas e procedimentos padronizados e importados.

Nosso projeto tem como objetivo congrega os fundamentos, técnicas, recursos e métodos necessários para desenvolver bons projetos acústicos para salas cuja utilização seja diretamente relacionada com a produção e/ou a apreciação musical. Pretendemos com isso “nacionalizar” as competências requeridas para que esses projetos sejam desenvolvidos. Por “nacionalizar”

pretendemos expressar tanto adaptação e desenvolvimento técnicas, recursos e métodos que levem em consideração as características de influência em percepção de qualidade peculiares ao nosso contexto regional (climático, econômico e sócio cultural), como também disponibilizar essas competências de forma ampla e aberta nesse mesmo contexto.

Como forma de efetivar os objetivos do projeto conforme delineados acima, devemos analisar as variáveis que compõem os parâmetros acústicos determinantes em ambientes de pequenas e médias dimensões destinados à produção musical – pequenas salas de concertos, auditórios, estúdios, salas de aula de música, salas de gravação, etc. – e, utilizando metodologias modernas de desenvolvimento de software, construir ferramentas computacionais para medição e manipulação desses parâmetros, as quais servirão de base para ferramentas de simulação e projeto de ambientes destinados à produção e à apreciação musical.

Mais especificamente, nosso projeto tem os seguintes objetivos concretos:

- a) Estudar os parâmetros acústicos que se mostram como determinantes na qualidade de salas destinadas à produção e à apreciação musical, com ênfase em ambientes de pequeno e médio porte.
- b) Desenvolver um sistema computacional capaz de:
  - realizar medidas acústicas em ambientes diversos e efetuar avaliações dessas medidas;
  - realizar simulações do comportamento acústico de ambientes, permitindo sua avaliação em função de características específicas, tais como forma geométrica, composição das superfícies, posicionamento das fontes acústicas, tipo de uso a que se destina o ambiente, etc.
- c) A partir dos elementos do item anterior, fornecer ferramentas para a realização de projetos adequados de espaços musicais ou para a correção do comportamento acústico de ambientes destinados à música.

Algumas ferramentas computacionais já foram implementadas no âmbito do projeto, constituindo os primeiros resultados obtidos nesse empreendimento de pesquisas. Outros trabalhos em andamento, na forma de projetos de mestrado, devem permitir a apresentação de novos resultados em breve. Nas próximas seções descrevemos as ferramentas computacionais já disponíveis e os projetos de mestrado em andamento. Os resultados do projeto são todos divulgados para livre acesso pela internet.

## **2. Resultados obtidos até o momento**

Vários fatores influenciam o resultado daquilo que ouvimos dentro de uma sala, especialmente em relação à música. A importância do controle destes fatores é crucial na determinação do resultado sonoro em situações tão diferentes como concertos, gravações, difusão de música eletroacústica e audição de material previamente gravado. Em (D'Antonio & Cox, 1997) encontramos enumerados os fatores mais críticos, dentre eles a qualidade da aparelhagem eletrônica, a qualidade e disposição dos alto-falantes, a habilidade de escuta e localização do ouvinte, as dimensões e geometria da sala e a condição acústica das superfícies que delimitam a sala e seus componentes.

As características acústicas de uma sala são especialmente importantes dentro dos contextos de produção e apreciação musical. Algumas dessas características, referidas como “atributos subjetivos de qualidade acústica e musical” por Beranek (Beranek, 1962), tais como presença,

calor, intimidade, claridade, difusão, brilho ou textura, são determinantes no resultado musical que pode ser produzido em uma sala específica.

A parte central deste projeto inclui a criação de um software para a medição e gerenciamento acústico de ambientes projetados com finalidades musicais. A título de experimentação, o nosso grupo já iniciou o desenvolvimento de alguns componentes desse sistema. A filosofia do projeto é utilizar-se ao máximo de tecnologias padrão e de software de código aberto de modo a facilitar a portabilidade e baratear a implementação do sistema. Nesta fase inicial, diversas plataformas computacionais já estão sendo testadas e suas particularidades analisadas para que, à medida em que o projeto for avançando, seja possível optar pelo ambiente (hardware e software) que irá compor o sistema final. Atualmente temos um bolsista de mestrado estudando os parâmetros subjetivos de qualidade acústica de salas que irá auxiliar na implementação desse ambiente computacional.

A seguir descrevemos a arquitetura geral do software, detalhando os itens já desenvolvidos. O sistema será composto por dois módulos principais:

#### A - Geração e medição de sinais acústicos:

Este módulo incluirá um componente capaz de gerar sinais de áudio específicos e compará-los com uma leitura desses mesmos sinais captados via microfone dentro de uma sala. Os sinais captados serão comparados com o sinal original, visualizados através de interfaces gráficas e armazenados em arquivos de áudio digitalizado para posterior análise dos parâmetros relevantes. Esses parâmetros devem ser também produzidos com base em estimativas e cálculos teóricos, possibilitando comparar os resultados empíricos obtidos com resultados teóricos esperados. Os parâmetros relevantes considerados são:

- I. **Tempos de reverberação (RT60, RT30 e RT20):** por meio de medição da resposta da sala a um impulso são calculados os tempos de reverberação de uma sala. Esse é um dos principais fatores determinantes da qualidade acústica da sala e indica o tempo que um determinado som demora para decrescer em 60dB depois que a fonte sonora é interrompida (Schröder, 1965; Beranek, 1962; Polack, 1992). As medidas de RT30 e RT20 são utilizadas em situações em que não se pode obter uma reação sinal/ruído adequada para medir o RT60 diretamente. Os resultados obtidos são dados para até 31 bandas de frequência de largura de 1/3 de oitava entre 20Hz e 20KHz. O tempo de reverberação RT60 *teórico* para uma sala, pode ser também calculado com base em sua geometria, no revestimento interno das paredes e nas dimensões e materiais de janelas. Um software destinado ao cálculo do RT60 implementado em Java está disponível no sítio eletrônico do projeto. A interface de uso desse software é auto explicativa e está apresentada na Figura 1.

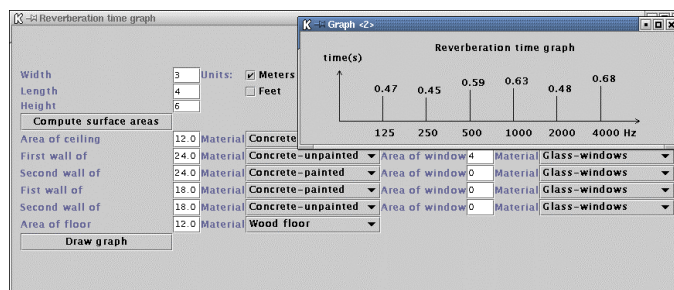


Figura 1. Tempo de reverberação teórico RT60

- II. **EDT (Early Decay Time):** tempo de reverberação medido para os primeiros 10dBs de decaimento em faixas de frequência de uma oitava de largura. Essa medição, expressa em milissegundos, oferece uma avaliação alternativa do tempo de reverberação da sala.
- III. **Definição (D50):** razão entre a energia total e a energia inicial sonora, dada em porcentagem.
- IV. **Clareza: (C50):** razão da energia entre a chegada dos primeiros e últimos impulsos sonoros, dada em dB.
- V. **Tempo Central (TS):** tempo do centro de gravidade da raiz quadrada de uma resposta a um impulso sonoro. Valores muito altos para esse parâmetro (dados em milissegundos) indicam uma baixa clareza sonora.
- VI. **Resposta de frequência e resposta impulsiva da sala:** a resposta de frequência é gerada pela emissão de um sinal de referência (ruído rosa) no ambiente reverberante. O som do ambiente é então captado e o resultado visualizado em tempo real num gráfico de amplitude por frequência, em faixas de frequência de 1/3 de oitava. Além disso serão implementados dois métodos de medição de resposta a impulso (impulse response) (Schröder, 1965; Berkhout et al., 1980): TDS (Time Delay Spectrometry) (Heyser, 1967) e MLS (Maximum Length Sequence) (Gerges & Gomes, 1991). Neste momento, um bolsista de Iniciação Científica está desenvolvendo um trabalho de análise comparativa entre métodos de medição e suas implementações.
- VII. **Frequência teórica:** é possível também realizar o cálculo da frequência *teórica* de uma sala com base em sua geometria, que pode ser obtida utilizando o software disponível no sítio eletrônico do projeto. A interface de uso desse software está apresentada na Figura 2.

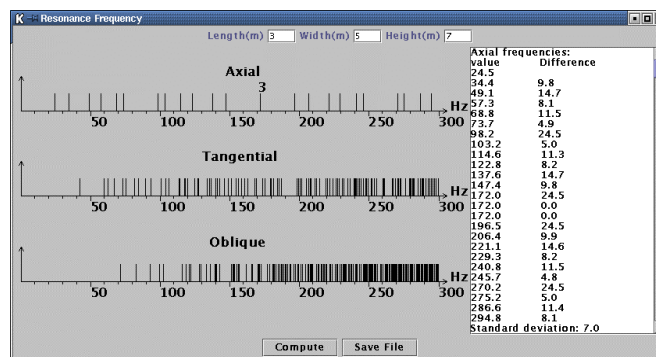


Figura 2. Resposta de frequência teórica

- VIII. **Velocidade de propagação do som:** a velocidade de propagação do som depende de fatores ambientais, como por exemplo umidade relativa do ar e temperatura ambiente. A velocidade de propagação do som *teórica*, calculada com base na umidade relativa e na temperatura do ar, pode ser obtida utilizando o software disponível no sítio eletrônico do projeto. A interface de uso desse software está apresentada na Figura 3.

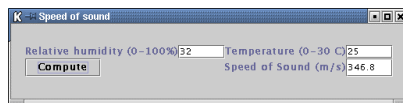


Figura 3. Velocidade de propagação do som

- IX. **ITGD (*Initial Time Gap Delay*)**: é um dos fatores decisivos para a qualidade acústica de um ambiente. Para se manter o controle do ITGD é ideal evitar que as primeiras reflexões do som cheguem aos ouvintes num intervalo menor do que 20 milissegundos (Davis, 1979). Isso é particularmente crítico para salas de pequena dimensão nas quais as superfícies refletoras estão muito próximas do ouvinte fazendo com que o som refletido chegue imediatamente após o som direto. Cálculos de ITGD podem auxiliar no correto tratamento das superfícies de um ambiente.
- X. **Características espectrais das ondas sonoras**: são ferramentas básicas para áudio, acústica e projetos. Na Figura 4 apresentamos a interface do analisador espectral disponível no sítio eletrônico do projeto.

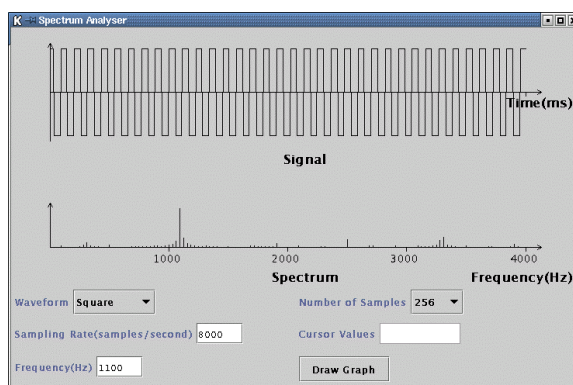


Figura 4. Analisador espectral

- XI. **Difusores de Schröder**: os modos de ressonância são um aspecto fundamental na composição acústica de um ambiente em relação às frequências mais baixas (até aproximadamente 300 Hz). Por outro lado, para frequências médias e agudas o padrão de difusão das ondas sonoras refletidas pelas superfícies adquire grande importância (Rindel, 1995). Idealmente, quanto mais distribuída e homogênea a difusão, melhor a qualidade do ambiente como um todo. Buscando resolver a questão da falta de reflexões laterais em salas de concerto de dimensões típicas (isto é, estreitas e compridas), Manfred Schröder projetou um tipo de superfície altamente difusora (Schröder, 1975; Schröder, 1984; D'Antonio & Konnert, 1983; D'Antonio & Konnert, 1984) que pode ser utilizada em inúmeras situações que exijam uma condição crítica da audição, como salas de concerto ou estúdios de gravação. Os difusores de Schröder possibilitam o espalhamento uniformemente distribuído das reflexões em uma sala. Eles consistem em uma série periódica de fendas igualmente espaçadas com profundidades diferentes aplicadas a uma determinada superfície formando um padrão repetitivo. Tanto o padrão quanto a profundidade máxima das fendas são determinadas por cálculos matemáticos de diferentes naturezas em função da faixa do espectro de frequências em que o difusor deve atuar. Esta componente do sistema realizará os cálculos necessários

para se projetar difusores de Schröder unidimensionais para atuar em faixas específicas de frequência.

- XII. **Absorvedores de Helmholtz:** o controle de frequências graves dentro de um ambiente é particularmente difícil, se baseado apenas no tratamento das superfícies ou na geometria da sala. Muitas vezes é necessário o uso de absorvedores sintonizados em faixas específicas de frequências para evitar a ocorrência de ressonâncias acentuadas abaixo dos 200Hz. Para isso são empregados absorvedores de Helmholtz projetados para atenuar faixas de frequência específicas.

### **B - Simulação de ambientes:**

Este módulo possibilitará a simulação e a otimização do comportamento de diversas situações acústicas, detectando eventuais problemas e indicando soluções adequadas. Um software de simulação pode ser útil, por exemplo, no projeto de um novo ambiente, ou para prever modificações em uma sala, para que se alcancem resultados acústicos específicos (D'Antonio & Cox 1997; Vian, 1986; Warusfel, 1995; Rindel, 1997; Rindel, 2000). Com isso, diversos fatores podem ser controlados para otimizar a qualidade acústica de ambientes destinados à produção e à apreciação musical. Isto pode ser alcançado ajustando-se parâmetros tais como distribuições das caixas acústicas no ambiente, posicionamento dos ouvintes em relação às fontes sonoras, escolha de materiais com diferentes coeficientes de absorção acústica e determinação de sua distribuição pelas superfícies da sala e até mesmo o cálculo de dimensões ótimas para a construção de uma nova sala de escuta.

O software aqui desenvolvido deverá realizar os seguintes processos:

1. Cálculo de posicionamento de fontes de geração sonora e ouvintes dentro de um ambiente.
2. Simulação de coeficientes de absorção de salas: as características acústicas de um ambiente são dadas não apenas por sua geometria, mas pelos coeficientes de absorção acústica de cada uma de suas superfícies. Um estudante de mestrado em nosso grupo de pesquisas está construindo o software que possibilitará a simulação dos atributos acústicos de uma sala caso sejam efetuadas determinadas intervenções em suas características. Por exemplo, a partir dos dados levantados empiricamente a respeito de uma sala, poderão ser estimados os atributos esperados para a sala caso o revestimento de suas paredes seja modificado.
3. Mapa 3D do comportamento acústico da sala: um estudante de mestrado em nosso grupo de pesquisas está construindo o software que possibilitará a visualização tridimensional das frequências encontradas em cada ponto no interior de uma sala com base em suas características físicas e no posicionamento e atributos das fontes sonoras na sala.

### **3. Comentários Finais**

Nosso projeto de pesquisas tem duração prevista de três anos. Estamos agora em nosso primeiro ano de atividades. A equipe de pesquisadores é multidisciplinar, congregando pesquisadores de diversos departamentos, entre eles os Departamentos de Música, de Ciência da Computação, de Física e Engenharia de Universidade de São Paulo. A interação entre esses departamentos, promovida por essa iniciativa de pesquisa, tem apresentado possibilidades inusitadas e prolíficas de integração entre as metodologias e valores consagrados para a produção de resultados científicos e artísticos em ciências exatas, humanidades, artes e matemática.

#### 4. Referências bibliográficas

- Beranek, Leo L. (1962). *Music, Acoustics, and Architecture*. New York: John Wiley and Sons.
- Berkhout, A. J.; Vries, D. & Boone, M. M. "A new method to acquire impulse response in concert halls". *J. Acoust. Soc. Am.* 68(1), pp. 179-183, July, 1980.
- D'Antonio, Peter & Konnert, John H. "The reflection phase grating diffusor: design theory and application". *J. Audio Eng. Soc.*, vol.32, n°4, p.228-238. April, 1984.
- D'Antonio, Peter & Konnert, John H. "The Schröder quadratic-residue diffusor: design theory and application". AES 74th Convention, New York. October 8-12, 1983.
- D'Antonio, P. & Cox, T.J. "ROOM OPTIMIZER: A Computer Program to Optimize the Placement of Listener, Loudspeakers, Acoustical Surface Treatment and Room Dimensions in Critical Listening Rooms". 103<sup>rd</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Preprint 4555, Paper H-6, New York. September, 1997.
- Davis, Don. "The role of Initial Time-Delay Gap in the Acoustic Design of Control Rooms for Recording and Reinforcing Systems". Sixty-fourth Audio. Engr. Soc. Convention, November 1979.
- Gerges, S. N. Y. & Gomes, A. G. "Modelling of Room Acoustic Parameters Using MLS Technique and Numerical Simulation". In 7<sup>th</sup> International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- Heyser, Richard C. "Acoustical Measurements by Time Delay Spectrometry", *J.AES*1967, pp. 370, 1967.
- Polack, J.-D. *Modifying Chambers to play Billiards: the Foundations of Reverberation Theory*. *Acustica*, 76(1):257-272, 1992.
- Rindel, Jens Holger. "Computer Simulation Techniques for the Acoustical Design of Rooms - how to treat reflections in sound field simulation". Proceedings of ASVA'97, pp. 201-208. Tokyo, 2-4 April, 1997.
- Rindel, Jens Holger. "Diffusion of sound in rooms - an overview". In 15th Intl. Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, pp. 633-636, 1995.
- Rindel, Jens Holger. "The Use of Computer Modeling in Room Acoustics". *Journal of Vibroengineering*, Vol. 3, N° 4, pp. 41-72, 2000.
- Schröder, M. R. "Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences". *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 57, pp. 149-151, 1975.
- Schröder, M. R. "New Method for Measuring Reverberation Time". *J. Acous. Soc. Am.*, Vol. 37, pp. 409-412, 1965.
- Schröder, M. R. "Progress in Architectural Acoustics and Artificial Reverberation: Concert Hall Acoustics and Number Theory" *J. Audio Engr. Soc.*, Vol. 32, N° 4, 1984 April, pp. 194-203.
- Vian, Jean-Paul. "Different computer modeling methods - their merits and their applications". In 12th Intl. Congress on Acoustics, Toronto, Canada. paper E4-10, 1986.
- Warusfel, Olivier. "Predictive acoustics software and computer aided optimization in room acoustics". In 15th Intl. Congress on Acoustics, Trondheim, Norway, pp. 693-696, June 1995.