



Parâmetros Subjetivos em Salas Destinadas à Prática Musical

Fernando Iazzetta^a, Fábio Leão Figueiredo^a, Bruno Sanches Masiero^b,

^a *Departamento de Música, ECA, Universidade de São Paulo, Brasil, fabioflf@hotmail.com, iazzetta@usp.br*

^b *Departamento de Engenharia de Telecomunicações, POLI, Universidade de São Paulo, Brasil, bruno.masiero@poli.usp.br*

RESUMO: Nos últimos 2 anos temos trabalhado junto a um grupo de pesquisadores da Universidade de São Paulo em um projeto voltado para a investigação do comportamento acústico de pequenas salas (Projeto AcMus). Este artigo descreve os resultados obtidos em relação à determinação dos parâmetros acústicos subjetivos envolvidos na avaliação de salas de pequeno e médio porte destinadas à prática musical. Inicialmente, é descrito um sistema de medição acústica criado especificamente para o projeto. O sistema é baseado na obtenção da resposta impulsiva pela excitação da sala com sinais MLS e varreduras (lineares e logarítmicas) e oferece ferramentas para cálculo de diversos parâmetros acústicos. A seguir introduzimos os problemas relacionados aos parâmetros acústicos subjetivos como vivacidade, brilho, calor, clareza, impressão especial, etc. Esses parâmetros subjetivos podem ser correlacionados aos parâmetros objetivos, tais como tempo de reverberação, variação de energia em função do tempo, ITGD, etc. Finalmente apresentamos o trabalho que estamos realizando para qualificar algumas salas de concerto em função do relacionamento entre parâmetros objetivos e subjetivos.

ABSTRACT: During the last two years we have been working on a project at the University of São Paulo, Brazil devoted to the investigation of acoustic behavior of small rooms (AcMus Project). This paper describes some results related to the determination of subjective acoustic parameters for small rooms projected to music performance and music production. First we describe the implementation of a program for acquiring the impulse response. The system is based on MLS and logarithmic sweep methods and offers tools for estimating different acoustic parameters. Then, we introduce some questions related to subjective acoustic parameters such as liveness, warmth, brilliance, loudness, clarity and definition. These parameters can be related to objective parameters such as reverberation time, energy variation, and ITGD. Finally we present some work we are doing to qualify the acoustic behavior in rooms for music performance.

1. INTRODUÇÃO

Em 2002 iniciamos na Universidade de São Paulo, Brasil, um projeto de pesquisa em acústica de salas voltado para questões musicais. O núcleo de trabalho, intitulado AcMus [1], concentra-se no desenvolvimento de ferramentas computacionais para projeto, medição e simulação do comportamento acústico de salas destinadas à música. Uma parte importante de nosso trabalho consiste na investigação dos principais aspectos que influenciam a produção e recepção de material musical.

Embora muitos parâmetros acústicos possam ser determinados a partir de medições e cálculos específicos [2, 3], nosso interesse recai sobre os parâmetros de natureza subjetiva, ou seja, aqueles relacionados com a sensibilidade e percepção dos indivíduos em um determinado ambiente.

Apesar de relacionados com dados extraídos da percepção subjetiva, esses parâmetros possuem correlação direta com atributos físicos das salas. Beranek [5] faz um primeiro estudo extensivo sobre o papel dos parâmetros subjetivos na composição das características acústicas de uma sala. Desde então, têm se buscado desenvolver critérios objetivos para formulações teóricas e medições acústicas através das quais avaliam-se em termos quantitativos as condições qualitativas da acústica das salas [6, 7, 8].

Parte desse processo inicia-se com o levantamento estatístico de questionários respondidos por um júri a respeito das impressões acústicas de uma determinada sala [9, 10]. Essas respostas são posteriormente confrontadas com medições realizadas nesses ambientes para, então, realizar-se o levantamento das qualidades acústicas. Nesse trabalho o primeiro problema encontrado refere-se à falta de precisão e objetividade nas avaliações realizadas pelos indivíduos que geralmente se expressam por meio de termos vagos ou cuja significação musical não corresponde precisamente a um atributo acústico.

Nas últimas décadas, diversos trabalhos têm se dedicado a realizar uma correlação entre parâmetros físicos e parâmetros subjetivos [9, 11, 12] que ajudam a definir a qualidade acústica de uma sala musical.

2. PARÂMETROS ACÚSTICOS SUBJETIVOS

Os parâmetros mais importantes estão representados por expressões matemáticas que geram índices objetivos, assumindo o papel de grandezas físicas mensuráveis, como TR para reverberação, C80 para a clareza e BR para a razão de graves, entre outros.

A seguir, uma breve descrição qualitativa dos termos que têm sido apontados como os mais relevantes para avaliação de qualidade acústica de salas de música:

- *Vivacidade (Liveness)*: Salas reverberantes são ditas salas "vivas", enquanto salas com elevado índice de absorção e que refletem pouco som para o ouvinte são ditas salas "mortas/secas". É uma qualidade relacionada diretamente ao tempo de reverberação da sala.
- *Calor (Warmth)*: Calor em acústica é definido como a presença dos graves. Ocorre quando o tempo de reverberação das baixas frequências (menores que 250 HZ) é suficientemente grande para garantir que tais frequências sejam claramente percebidas.
- *Brilho (Brilliance)*: O som brilhante de uma sala deriva da proeminência dos harmônicos superiores e do relativo baixo decaimento para essas frequências.
- *Nível de som direto e reverberante (Loudness of direct/reverberant sound)*: Impressão derivada da relação entre as contribuições da energia do som direto e do som reverberante, importante para a noção de intensidade e difusão sonora.
- *Intimismo (Intimacy)*: Impressão determinada pelo intervalo de tempo entre o som que chega diretamente e sua primeira reflexão proveniente das superfícies refletoras.

- *Clareza ou Definição (Clarity or Definition)*: Quando a música tocada numa sala soa bem definida, com articulações sonoras límpidas e precisas, dizemos que a sala apresenta bom grau de clareza.
- *Impressão Espacial (Spatial Impression)*: É o efeito psicoacústico causado pelas reflexões sonoras que atingem o ouvinte [13, 14] fazendo-o criar mentalmente uma sensação acústica espacial do ambiente. É influenciada pela difusão e pela *dissimilaridade biauricular* (medida da diferença entre o que é captado em cada um dos ouvidos ao longo do tempo de exposição).

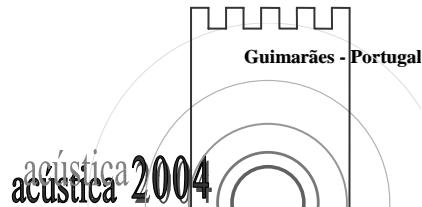
A tabela seguinte apresenta a relação entre parâmetros subjetivos e seus respectivos índices físicos:

Tabela 1 – Os parâmetros acústicos e suas expressões matemáticas

Parâmetro Subjetivo	Índice Objetivo	Expressão Física
Vivacidade	RT 60	Schroeder (1965)
Calor	BR	$\frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}$
Brilho	TR	$\frac{RT_{2000} + RT_{4000}}{RT_{500} + RT_{1000}}$
Nível de som	L	$10 \log [Ed / Er]$
Intimismo	ITDG	$t_d - t_r$
Clareza	C50	$10 \log \left[\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{-50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right]$
Impressão espacial	IACC	$\max \left \left[\int p_e(t) p_d(t + \alpha) dt \right] \cdot \left[\int p_e^2(t) dt \int p_d^2(t) dt \right]^{-1/2} \right $

Sendo que:

- RT_{60} é o tempo de reverberação. RT_{125} , RT_{250} , RT_{500} , são os tempos de reverberação nas bandas de frequência central 125 Hz, 250Hz, 500Hz e assim respectivamente. Um outro parâmetro relacionado à reverberação é o EDT (*early decay time*).
- BR é razão de graves (*bass ratio*) e TR é razão de agudos (*treble ratio*).
- t_d é o instante em que o som direto chega em determinado ponto de captação e t_r é o instante em que chega a primeira reflexão. A diferença entre esses dois instantes é o ITDG (*initial time delay gap*).
- Ed e Er são energia de som direto e reverberante, respectivamente.



- $p(t)$ é o valor da pressão acústica num dado instante. A expressão física da clareza C_{50} é a razão da energia que chega nos primeiros 50 milissegundos pela energia total. Essa razão também pode ser tomada nos primeiros 80 milissegundos (C_{80}).
- *IACC* (*interaural cross correlation*), é o valor máximo da função de correlação entre os sinais obtidos no ouvido esquerdo (p_e) e direito (p_d).

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS

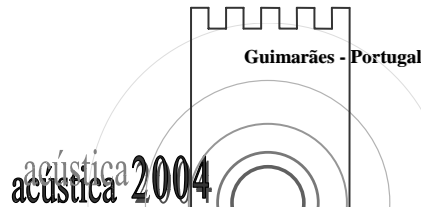
É importante notar que os principais parâmetros acústicos podem ser extraídos de um único sinal físico observável: a curva de resposta impulsiva (IR). A resposta impulsiva é definida como a resposta de um sistema a um impulso ideal (Delta de Dirac).

A partir dessa resposta, Schroeder [15] desenvolveu um método (integração do quadrado da resposta impulsiva) que otimiza o processo de obtenção dos tempos de reverberação (grandeza associada a alguns importantes parâmetros subjetivos). Esse método fornece uma curva do decaimento da energia em função do tempo, conhecida desde então como curva de Schroeder. O método de Schroeder obteve reconhecimento imediato e é amplamente utilizado até hoje, chegando a constar na norma ISO 3382 (*Acoustics- Measurements of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*) que serve de referência para medições acústicas que envolvam tempo de reverberação de salas.

Porém, a implementação do método de Schroeder requer primeiramente o levantamento da resposta impulsiva da sala. A forma de obtenção da resposta impulsiva foi tema de interessantes trabalhos publicados nas últimas décadas [16, 17, 18]. Anteriormente usava-se como sinal de excitação o estampido produzido por um tiro de pistola, por exemplo, o que apresentava certas desvantagens como falta de um padrão de repetibilidade, resposta irregular para certas faixas de frequência, além de uma relação sinal ruído insatisfatória.

O próprio Schroeder [14] publicaria um outro artigo mostrando um novo meio de obter a resposta impulsiva usando um ruído pseudo-aleatório ao invés de impulsos. Utilizando como sinal de excitação uma seqüência de máximo comprimento (MLS), que apresenta densidade espectral de potência plana como a de um ruído branco, mas com um padrão de perfeita repetibilidade, este método provê uma relação sinal ruído grande o suficiente para permitir a obtenção da resposta impulsiva em ambientes onde esteja ocorrendo música ou qualquer outro ruído de fundo.

Este método utiliza a transformada rápida de Hadamard (FHT) para o cálculo da resposta impulsiva. O algoritmo da FHT permite um cálculo bastante eficiente da IR, o que era de vital importância nos anos 70 e 80 (com a atual velocidade dos computadores, a técnica MLS já não apresenta uma vantagem tão grande frente aos demais métodos, em relação ao tempo de processamento). Com isso, esse método tornou-se bastante popular e passou a ser muito utilizado [19, 20, 21], estando atualmente presente até mesmo em plug-ins de softwares de áudio de circulação comercial.



Paralelamente à técnica MLS, outras sofisticadas técnicas de obtenção da resposta impulsiva foram sendo desenvolvidas. A que mais se destacou foi a técnica que utiliza *sweep sine* ou varredura de senos como sinal de excitação [28, 29]. Aqui, a função de transferência da sala é obtida via transformada rápida de Fourier (FFT).

O *log sweep sine* ou varredura logarítmica de senos consiste de uma senóide cuja frequência varia logaritmicamente no tempo. O espectro deste sinal de excitação apresenta a mesma quantidade de energia em cada oitava, mesma característica espectral de um ruído rosa. Por ser muito menos sensível às não-linearidades e às variações temporais (características necessárias ao bom desempenho do MLS, mas que nem sempre ocorrem) esta técnica em geral garante uma resposta mais confiável para medições acústicas, apresentando uma relação sinal ruído bastante favorável. Por estas características, esta técnica se torna a mais recomendável para finalidades como auralização, e foi a técnica adotada como padrão para todas as medições do AcMus.

De posse da IR, independentemente do método utilizado para sua obtenção, realiza-se a filtragem em bandas de frequência e posterior tratamento deste sinal, para finalmente calcular-se os parâmetros acústicos objetivos. Este tratamento do sinal visa compensar o efeito do atraso na chegada do sinal, decaimento possivelmente não exponencial e ruído de fundo. Existe uma extensa literatura sobre métodos de tratamento de sinal acústicos, em especial [23, 24, 25] Lundeby 1995, Chu 1978 e Hirata 1982.

ANÁLISE SUBJETIVA

Apesar de todo o avanço no estudo da acústica musical realizado nas últimas décadas, ainda há muito a ser desenvolvido no campo dos parâmetros subjetivos. Várias questões ainda se colocam a esse respeito: Esses parâmetros permitem uma completa descrição da acústica da sala? Quais deles são independentes entre si? Quais são os mais relevantes? Como relacioná-los aos parâmetros físicos?

Os estudos psicoacústicos em salas de música têm sido realizados por meio de dois caminhos distintos: experimentos em laboratório e testes em salas reais. O primeiro caminho consiste em gravar passagens musicais em diferentes salas, utilizando equipamento adequado (*dummy head* biauricular, dispositivos digitais de alta fidelidade, etc) e depois reproduzi-las para um júri numa câmara anecóica ou mesmo em fones-de-ouvido. A vantagem desse método é permitir uma comparação instantânea e meticulosa entre as salas, estimulando uma compreensão bem específica de cada parâmetro. A desvantagem óbvia é que podem haver perdas na percepção das características acústicas, já que um ambiente real jamais será perfeitamente "transportado" para o laboratório.

Por outro lado, testes auditivos em salas reais, utilizando questionários sistematicamente estruturados, são eficientes na medida em que permitem a percepção acústica da maneira mais fiel. Porém, dificultam a comparação acurada entre as características acústicas das salas já que não poderão ser comparadas ao mesmo tempo, além de expor a uma variação simultânea de um grande número de parâmetros, diminuindo a capacidade de discriminação de cada um deles.

A terminologia adequada a ser utilizada nos questionários já foi objeto de estudo de alguns pesquisadores [9, 4, 12]. Tais questionários devem ser submetidos à avaliação de um júri musicalmente bem qualificado. Os dados subjetivos acumulados com os questionários devem ser submetidos a um tratamento estatístico por métodos de avaliação estatística de qualidade baseados na teoria de "análise multidimensional de qualidade". Um desses métodos utilizados é o de análise de fatores [26] em que os fatores consistem em variáveis independentes, físicas ou não, que descrevem a dinâmica do julgamento. A técnica pode ser empregada tanto para a análise de parâmetros objetivos (físicos) quanto subjetivos (psico-físicos).

Angelo Farina [12] sintetizou uma base para um questionário a ser empregado na avaliação subjetiva utilizando-se dos seguintes termos:

- | | |
|--|--|
| 1. agradável(<i>pleasant</i>) | desagradável(<i>unpleasant</i>) |
| 2. definido(<i>clear</i>) | confuso(<i>unclear</i>) |
| 3. macio(<i>soft</i>) | rígido(<i>hard</i>) |
| 4. difuso(<i>diffuse, involving</i>) | concentrado(<i>concentrated</i>) |
| 5. seco(<i>dry</i>) | reverberante(<i>reverberant</i>) |
| 6. agudosacentuados(<i>trebleemphasized</i>) | agudosnãoacentuados(<i>treblenotemph.</i>) |
| 7. gravesacentuados(<i>bassemphasized</i>) | gravesnãoacentuados(<i>bassnotemph.</i>) |
| 8. nívelsonorofraco(<i>weak</i>) | bomnívelsonoro(<i>loud</i>) |

Os dados do questionário alimentam uma matriz de coeficientes de correlação (medida que indica o quanto uma variável se relaciona à outra) entre os termos de qualidade acústica [27].

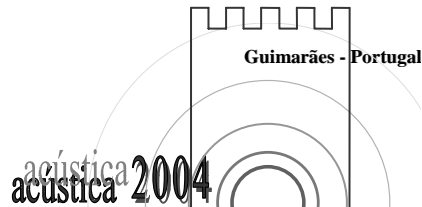
O Projeto AcMus está iniciando um programa de medições em alguns estúdios e salas de música da cidade de São Paulo. Para o levantamento dos parâmetros acústicos serão utilizadas as implementações de medição já concluídas. Nas análises subjetivas, a serem realizadas para as mesmas salas medidas, serão gravadas amostras musicais, a partir de performances reais, selecionadas de modo a contemplar distintamente os parâmetros subjetivos. Os conjuntos musicais convidados para as performances - Quarteto de Cordas da Cidade de São Paulo e Orquestra Sinfônica da USP - são grupos estáveis e de reconhecida competência musical. Posteriormente tais amostras serão apresentadas como objeto de avaliação sistemática para um júri musicalmente qualificado, cujas respostas serão tratadas estatisticamente.

5. AGRADECIMENTOS

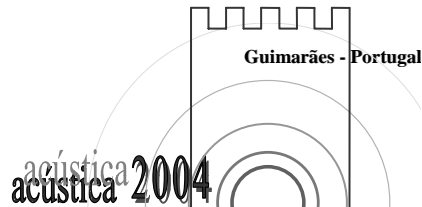
Essa pesquisa teve o financiamento da FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (proc. Nº 02/02678-0).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Iazzetta, F., Kon, F., Silva, F.S. (2001). AcMus: Design and Simulation of Music Listening Environments. *Anais do XXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*. (disponível em <http://gsd.ime.usp.br/acmus>)



- [2] Baxa, D. y Seireg, A. (1980). The use of quantitative criteria for the optimum design of concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol.67**, 2045-2054.
- [3] Jordan, V.L. (1981). A Group of Objective Criteria for Concert Halls. *Applied Acoustics*, **Vol.14**, 253-266.
- [4] Hawkes, R. y Douglas, H. (1971). Subjective Acoustics Experiences in Concert Auditoria. *Acustica*, **Vol 25**, 236-250.
- [5] Beranek, L. (1962). *Music, Acoustics & Architecture*. London: Wiley.
- [6] Schroeder, M. et.al. (1966). Acoustical Measurements in Philharmonic Hall. *J. Acoust. Soc. Am.* **Vol 40**, 434-440.
- [7] Jordan, L. (1970). Acoustical Criteria for Auditoriums and Their Relation to Model Techniques. *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol 47**, 408-412.
- [8] Hulbert, G., Baxa, D. y Seireg, A. (1982). Criterion for quantitative rating and optimum design of concert halls . *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol.71**, 619-629.
- [9] Wilkens, H. y Plenge, G. (1974). The correlation between subjective and objective data of concert halls. *Auditorium Acoustics*. London: Applied Science.
- [10] Gade, A. C. (1989). Investigation of musicians' room acoustic condition in concert halls, part I. *Acustica*, **Vol.69** ,p193.
- [11] Schroeder, M., Siebrasse, K. (1974). Comparative study of European halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustics parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol 56**, 1195-1201.
- [12] Farina, A. et al. (1994). Acoustic Quality of Theaters: Correlation Between Experimental Measures and Subjective Evaluation. *Istituto di Ingegneria dell'Università di Ferrara*, **n.14** (disponível em [HTTP://pcfarina.eng.unipr.it](http://pcfarina.eng.unipr.it))
- [13] Barron, M. (1971). The Subjective Effects of the First Reflections in Concert Halls – The Need for Lateral Reflections. *J. Sound Vib.* **Vol.15**, 475-494.
- [14] Schroeder, M. (1979). Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion. *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol 65**, 958-963.
- [15] Schroeder, M. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *J. Acoust. Soc. Am.*, **Vol. 37**, 409-412 .
- [16] Berkhout, D. et.al. (1980). A new method to acquire impulse responses in concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.* **Vol.68**, 179-183.
- [17] Borish, J. y Angell, J.B. (1983). An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise. *J. Audio Eng. Soc.*, **Vol. 31**.
- [18] Chu, W.T. (1990). Impulse Response and Reverberation Decay Measurements Made by Using a Periodic Pseudorandom Sequence. *Applied Acoustics*, **Vol.29**, 193-205.
- [19] Rife, D. (1992). Modulation Transfer Function Measurement with Maximum-Length Sequences. *J. Audio Eng. Soc.* **Vol. 40**.
- [20] Vanderkooy, J. (1994). Aspects of MLS Measuring Systems. *J. Audio Eng. Soc.*, **Vol. 42**.
- [21] Vorländer, M. y Kob, M. (1997). Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics. *Applied Acoustics*, **Vol. 52**.
- [22] Gomes, M. y Gerges, S. (2001). Modelling of Room Acoustic Parameters Using MLS Technique and Numerical Simulation *IBPSA Conference*, Rio de Janeiro.
- [23] Lundeby A., Vigran T.E., Bietz H., Vorländer M. 1995. Uncertainties of Measurements in Room Acoustics. *Acustica* Vol. **81** (1995). pp. 344–355



- [24] Chu W. T. Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *J. Acoust. Soc. Am.* **63**(5), May 1978. pp. 1444–1450.
- [25] Hirata (1982) Y. A Method of Eliminating Noise in Power Responses *J. Sound Vib.* vol. **82** pp. 593–595.
- [26] Harman, H. N. (1968). *Modern factor analysis*. Chicago:University of Chicago press.
- [27] Yamaguchi, K. (1972). Multivariate Analysis of Subjective and Physical Measures of Hall Acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.* **Vol.52**, 1271-1279.
- [28] Farina, A. (2000). Simultaneous Measurements of Impulse Response and Distortion with a Swept Sine Technique. *AES Conference*, France, 2000.
- [29] Müller, S., Massarani P. (2001). Transfer Function Measurements with Sweeps. *J. Audio Eng. Soc.*, **Vol. 49**, p. 443.