

**I Seminário**  
**Música Ciência Tecnologia**  
**Acústica Musical**

**São Paulo – IME / USP**  
**3 a 5 de novembro de 2004**

**Organização:** Prof. Dr. Fernando Iazzetta  
Prof. Dr. Marcelo Queiroz

**Equipe de Produção:** Leo Kazuhiro Ueda  
Fábio Leão Figueiredo



## ÍNDICE

<b>Apresentação</b>	<b>2</b>
<b>Programação</b>	<b>4</b>
<b>Listening tests performed inside a virtual room acoustic simulator</b> Angelo Farina	<b>7</b>
<b>Método híbrido para simulação numérica de acústica de salas: teoria, implantação computacional e validação experimental</b> Roberto Aizik Tenenbaum & Thiago Schaaf Camilo	<b>26</b>
<b>Investigação experimental da direcionalidade sonora de uma harpa de concerto</b> J.R.F. Arruda; F. Gautier; M. Renger; J.L. Le Carrou; J. Gilbert	<b>41</b>
<b>Análise comparativa dos difusores de Schroeder com a organização serial na técnica de composição com 12 notas de Schoenberg: proposta de métodos para <i>design</i> de difusores acústicos</b> José A. Mannis & Jonatas Manzolli	<b>52</b>
<b>Uma introdução à acústica da voz cantada</b> Maurílio Nunes Vieira	<b>70</b>
<b>Qualidade sonora dos ambientes e produtos</b> Samir N. Y. Gerges , Márcio A. Gomes, e Fabiano Lima	<b>80</b>
<b>Difusão sonora em salas: paradigmas do passado e estado da arte</b> Sylvio R. Bistafa	<b>98</b>
<b>Aspectos acústicos, fisiológicos e perceptivos da execução e construção de instrumentos de sopro</b> Leonardo Fuks	<b>130</b>
<b>Novo sistema para medições acústicas</b> Sven Müller	<b>134</b>
<b>A diversidade de sinais e sistemas de comunicação sonora na fauna brasileira</b> Jacques M. E. Vielliard	<b>145</b>
<b>Sobre a influência do teto móvel na qualidade acústica da Sala São Paulo</b> Roberto A. Tenenbaum & Lenine Vasconcellos	<b>153</b>
<b>Os harmônicos da energia elétrica no áudio</b> Jorge Knirsch	<b>171</b>
<b>Acústica em <i>homestudios</i></b> Omid Bürgin	<b>186</b>
<b>Estudo científico de escalas e temperamentos com cento e comas</b> Hidetoshi Arakawa	<b>191</b>
<b>Estudo e implementação de métodos de medição de resposta impulsiva</b> Bruno Sanches Masiero & Fernando Iazzetta	<b>200</b>
<b>Impacto ambiental e ocupacional: o ruído como um problema de saúde pública</b> Ana Cláudia Fiorini	<b>210</b>
<b>Técnicas de medição em acústica de salas</b> Nicolas Isnard	<b>211</b>

## APRESENTAÇÃO

Os textos que se encontram a seguir foram apresentados durante o I **Seminário Música, Ciência e Tecnologia: Acústica Musical**, realizado em conjunto pelo Departamento de Música e pelo Instituto de Matemática e Estatística da USP nos dias 3, 4 e 5 de novembro de 2004. Eles refletem o caráter interdisciplinar que pode estar envolvido quando se abordam diversas questões relacionadas ao estudo de problemas musicais.

A pesquisa interdisciplinar envolvendo Música, Ciência e Tecnologia vem sendo desenvolvida no país há algumas décadas por grupos e indivíduos espalhados pelos mais diversos setores do meio acadêmico e empresarial. A divulgação dessa pesquisa dá-se, freqüentemente, no âmbito de encontros científicos restritos apenas a uma das áreas envolvidas, e com isso deixa de atingir uma grande parcela da comunidade acadêmica interessada.

Com o aumento significativo da quantidade de grupos de pesquisa, bem como das sub-áreas de pesquisa interdisciplinar envolvendo *música* e uma ou mais áreas científicas ou tecnológicas, aumenta a demanda por encontros científicos que mantenham seu caráter amplo e multidisciplinar, mas ao mesmo tempo permitam uma maior especialização por meio da definição de um foco ou tema principal. Pesquisadores envolvidos em sub-áreas deste universo multidisciplinar tais como Acústica de Salas, Acústica de Instrumentos, Síntese Digital, Processamento de Sinais, Composição/Análise Assistida por Computador, Performance Interativa e Modelos Psicoacústicos, entre outros, teriam nesses encontros específicos a oportunidade de uma interação muito mais aprofundada e proveitosa com outros pesquisadores que trabalham em problemas afins.

O I **Seminário Música, Ciência e Tecnologia: Acústica Musical** corresponde a uma proposta concreta nesta direção. Este primeiro encontro foi promovido pelo grupo de pesquisas em Acústica Musical (AcMus) da Universidade de São Paulo, e por esta razão teve como foco a sub-área de "Acústica Musical". O Seminário faz parte também das atividades promovidas pelo MusArtS, projeto apoiado pela Fapesp que congrega diversos pesquisadores, núcleos e centros de pesquisa que investigam a música em suas interfaces com outras disciplinas do âmbito das

ciências e da tecnologia. Além do alto nível das palestras apresentadas, devemos destacar que o evento possibilitou uma grande interação e troca de experiências entre pesquisadores brasileiros atuantes na área, bem como permitiu a divulgação dos resultados de pesquisa dos grupos participantes.

O formato de palestras ministradas por convidados especialistas que adotamos neste primeiro Seminário pôde, por um lado, privilegiar o intercâmbio entre grupos de pesquisa estabelecidos na área de acústica e, por outro, ampliar a possibilidade de participação de pesquisadores atuando em áreas afins. Os palestrantes convidados encontram-se entre os mais destacados nomes de diversas áreas em que se conectam os temas da música e da acústica, estendendo-se da bioacústica à lutheria, da acústica arquitetônica à psicoacústica. Destacamos ainda a presença do Prof. Angelo Farina, da Universidade de Parma, atualmente um dos mais importantes e atuantes pesquisadores nas áreas de medição e simulação acústica. Sua contribuição ao público presente no Seminário foi inestimável, não apenas pelo alto nível de suas palestras e *workshops*, mas também pela generosidade com que dividiu os resultados de suas pesquisas com os participantes.

Gostaríamos de agradecer ao Instituto de Matemática e Estatística da USP e à empresa 01dB pelo apoio dado na realização do Seminário e à Fapesp pelo suporte ao nosso grupo de pesquisa em acústica de salas, Grupo AcMus, bem como pela ajuda no financiamento deste evento.

*Marcelo Queiroz e Fernando Iazzetta, Organizadores*

# PROGRAMAÇÃO

## QUARTA-FEIRA, 3/11/2004

<09h30>	<b>INSCRIÇÕES</b>
<10h00>	<b>ABERTURA DO EVENTO</b>
<10h30>	<i>Listening Tests Performed Inside A Virtual Room Acoustic Simulator</i> <b>Angelo Farina, Universidade De Parma</b>
<12h00>	<b>ALMOÇO</b>
<14h00>	<b>COMUNICAÇÃO DE ABERTURA</b> <b>Prof. Fernando Perez, Diretor Científico da Fapesp</b>
<14h15>	<i>Qualidade Sonora dos Ambientes e Produtos</i> <b>Samir N. Y. Gerges, UFSC</b>
<15h00>	<i>Técnicas de Medição em Acústica de Salas</i> <b>Nicolas Isnard, 01dB</b>
<16h00>	<b>INTERVALO</b>
<16h15>	<i>Investigação Experimental da Directividade de uma Harpa de Concerto</i> <b>José R. França Arruda, UNICAMP</b>
<17h00>	<i>Difusão Sonora em Salas: Paradigmas do Passado e Estado da Arte</i> <b>Sylvio Bistafa, USP</b>
<17h45>	<b>INTERVALO</b>
<18h00>	<i>Os Harmônicos da Energia Elétrica e o Áudio</i> <b>Jorge Knirsch, By Knirsch</b>

# PROGRAMAÇÃO

## QUINTA-FEIRA, 4/11/2004

<09h00> **WORKSHOP: *Measuring the Acoustical Impulse Response of a Room - Parte1/2***

**Angelo Farina, Universidade de Parma**

---

<10h30> ***Novo Sistema para Medição Acústica***

**Swen Müller, INMETRO**

---

<12h00> **ALMOÇO**

---

<14h00> ***Qualidade Acústica da Sala São Paulo***

**Roberto Tenenbaum, COPPE, UFRJ**

---

<14h45> ***Impacto Ambiental e Ocupacional: o ruído como um problema de saúde pública***

**Ana Cláudia Fiorini, PUCSP**

---

<15h30> **INTERVALO**

---

<15h45> ***Acústica da Fala e Música***

**Maurílio Nunes Vieira, UFMG**

---

<16h30> ***Estudo Científico das Escalas e Temperamentos com Cento e Comas***

**Hidetoshi Arakawa, UNICAMP**

---

<17h15> **INTERVALO**

---

<17h30> ***Acústica em HomeStudios***

**Omid Bürgin, Omid Studios**

# PROGRAMAÇÃO

## SEXTA-FEIRA, 4/11/2004

<09h00> **WORKSHOP: *Measuring the Acoustical Impulse Response of a Room Parte 2/2***

**Angelo Farina, Universidade de Parma**

---

<10h30> ***Acústica da Performance em Instrumentos de Sopro***

**Leonardo Fuks, UFRJ**

---

<12h00> **ALMOÇO**

---

<14h00> ***Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas***

**Roberto Tenenbaum, COPPE, UFRJ**

---

<15h30> ***Análise Comparativa dos Difusores de Schroeder com a Organização Serial na Técnica de Composição com 12 Notas de Schoenberg: proposta de métodos para design de difusores acústicos***

**José Augusto Mannis, UNICAMP**

---

<16h15> **INTERVALO**

---

<16h30> ***A Diversidade de Sinais e Sistemas de Comunicação Sonora na Fauna Brasileira***

**Jacques M.E. Vielliard, UNICAMP**

---

<17h15> ***Ferramentas Computacionais para Medição e Simulação de Salas: Resultados e Desafios***

**Grupo AcMus/USP)**

---

<18h00> **ENCERRAMENTO**



# LISTENING TESTS PERFORMED INSIDE A VIRTUAL ROOM ACOUSTIC SIMULATOR

**A. Farina, P. Martignon, A. Azzali, A. Capra**  
Industrial Engineering Department – University of Parma – Italy

Abstract: Auralization is a method for recreating the aural impression of a room. Usually it is implemented by convolution, employing dry (anechoic) music as the source signal, which is passed through a very long FIR filter, loaded with coefficients taken from the impulse response of the room to be simulated. This impulse response can be either measured or synthetic (obtained by a simulation performed through a room acoustics numerical solver, typically based, nowadays, on the beam-tracing computational scheme).

A software and hardware tool for real time processing and routing of the signal, allowing to switch among four different two-channels reproduction systems, was set up inside a listening room in the “Casa della Musica”, in Parma. The reproduction systems available are stereo dipole, double stereo dipole, “normal” stereo (ORTF) and headphones. The whole system is described, paying attention to room response, and principles and methods of the systems implemented are explained as well. A little discussion about pro and cons of different reproduction systems is proposed, to be checked in the future based on results of the currently going on comparative subjective tests.

## 1. INTRODUCTION

Many subjective tests have been carried out in the past by us and others to investigate correlation between subjective and objective parameters [1], mostly using headphones and more rarely other methods.

So, we first describe a set of preliminary listening tests performed during the spring 2004, employing a headphones-based binaural system, in which we did compare the acoustic behavior of 5 theatres, employing 6 different sound samples, and a questionnaire to be filled during the listening.

Here we describe the system employed for performing the listening tests, the creation of suitable inverse filters for making it perfectly “transparent”, and finally the software tool employed for controlling the playback of the sound samples and simultaneously for collecting the questionnaires.

A basic statistical analysis of the results did show quite bad correlation between objective parameters and subjective responses.

However, it resulted that the headphones system has some inherent weak points, so we started an investigation about “alternative” reproduction systems for stereo (2-channels) soundtracks, capable of conveying a better spatial impression and a more faithful enveloping.

A special listening room was set up, equipped with three additional systems:

- Stereo Dipole
- Dual Stereo Dipole
- Normal Stereo

In particular this multi-listening setup for two-channels systems arises from a research project, which sees the partnership of UNIPR and University of Sidney; it consists of subjective tests for investigating how much different two-channel systems can reproduce the perception of basic spatial characteristics of the virtual acoustic space, like source distance and room size. The results of these tests are yet to be completed and published, here we just describe and discuss the system implemented and the underlying technology.

As in the case of the preliminary test, here we describe the systems, the creation of suitable inverse filters for making them “transparent”, and the software tool employed for controlling the playback of the sound samples and for collecting the questionnaires.

Finally, a quick foreword of the forthcoming research is given, which will also include Ambisonics-based multichannel systems, planned to be implemented in our listening rooms during the next months.

## 2. PRELIMINARY SUBJECTIVE LISTENING TEST BY HEADPHONES

Aim of this preliminary session of listening test is the correlation between objective and subjective parameters. The knowledge of this relationship is the base for interventions on existent theatres or design of new ones.

### 2.1. Preparation

This preliminary test consisted in listening to several anechoic musical tracks auralized with the impulse response of some Italian theatres measured with a binaural microphone, and compiling at the same time a questionnaire.

The rooms object of the tests were: Auditorium Paganini (Parma), Auditorium Sala700 (Roma), Teatro Valli (Reggio Emilia), Teatro Regio (Parma), Teatro Olimpico (Vicenza). For the auralization, we did choose binaural impulse responses recorded with the Neumann KU-100 dummy head in the central position of every room between the 5<sup>th</sup> and the 6<sup>th</sup> row of seats.

The tracks used for the listening are divided in two categories: orchestrals and vocals. We choose this differentiation for the different function of theatres and auditorium.

There are three purely-orchestral tracks:

- Mozart, Overture of “*Le nozze di Figaro*”;
- Strauss, “Pizzicate Polka”;
- Verdi, Prelude at first act of “*La Traviata*”

and three vocal tracks:

- “*My funny Valentine*”;
- Mozart, aria from “*Così fan tutte*” vocal and piano;
- Tosti, “Non t’amo più”

The orchestral tracks were auralized making a convolution between binaural tracks recorded using omnidirectional speakers placed on the left and on the right of the stage. The pieces of Tosti and Mozart are made of a Left track, containing a piano, and a Right track containing the voice. We convolved the Left one with the recording of an omnidirectional source placed on the left of the stage and the right one with a directive source placed in the centre of the stage in order to recreate the concert configuration (piano on a side and the singer in the centre).

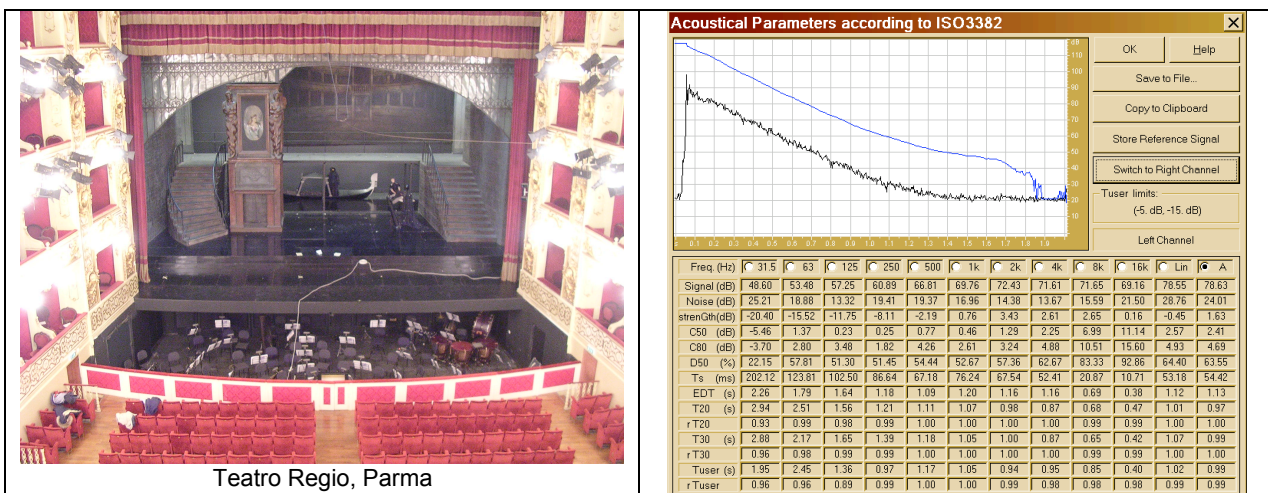
After this, the two resulting stereo tracks are mixed (left summed with left, right summed with right) and reproduced over headphones (Sennheiser HD580).

The playback system did include also a small subwoofer (Audio-Pro), set up with a cross-over frequency of approximately 60 Hz.

The “transparency” of the recording/reproduction chain is ensured by convolving the signal which feed the playback system with a pair of inverse-filters. They are designed based on a measurement of the transfer function of the playback system, which was performed placing the headphones over the same dummy head employed for the binaural impulse response measurements. This transfer function was numerically inverted making use of the Nelson-Kirkeby-Farina regularization method.

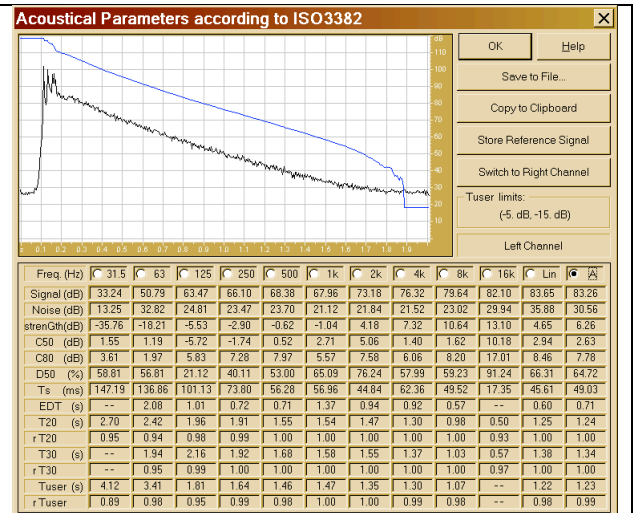
### 2.2. The theatres

Here we provide a photo and a plot of the impulse response of the 5 theatres:

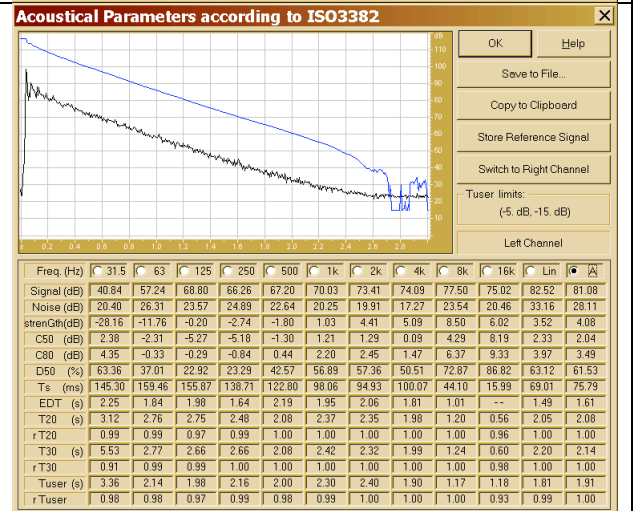




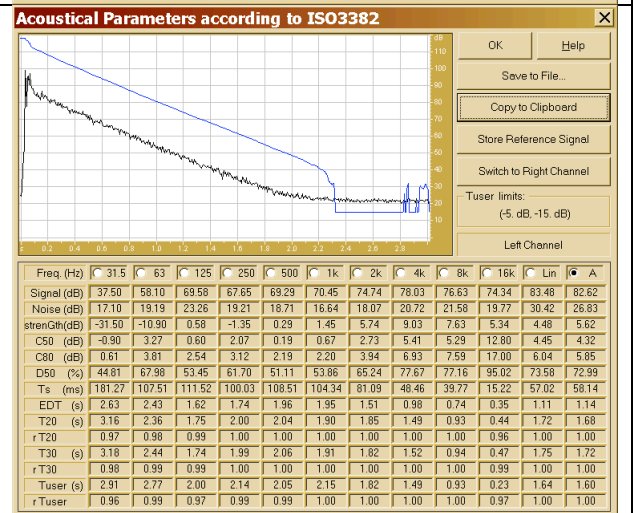
Teatro Valli, Reggio Emilia



Auditorium Paganini, Parma



Auditorium of Rome, Sala 700



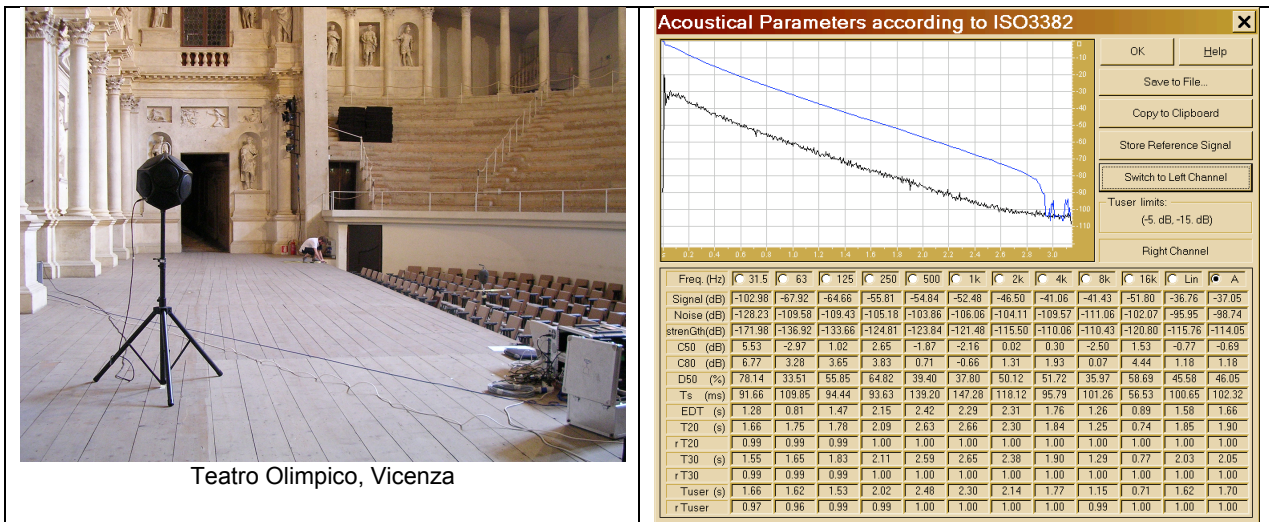


Fig. 1 – The 5 Italian theatres

### 2.3. Objective parameters

Thanks to the “acoustical parameter” plugin of the Aurora software package [2] we did compute the most frequently used acoustical parameters, according to the ISO 3382/1997 standard. For each of them, a short description is given here.

#### 2.3.1. T<sub>15</sub>, T<sub>30</sub>

Reverberation time calculated from the decay range between -5 and -20 dB (T<sub>15</sub>) and between -5 and -35 dB (T<sub>30</sub>) on the integrated Schroeder curve, in seconds.

Schroeder [3] found that the reverberant decay can be described by a backward integration of the impulse response:

$$\langle p^2(t) \rangle = N \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

Where:  $\langle p^2(t) \rangle$  = average of a infinite number of decay  
 $h^2(\tau)$  = impulse response.

Eq.(1) can be written as:

$$\langle p^2(t) \rangle = N \left( \int_0^\infty h^2(\tau) d\tau - \int_0^t h^2(\tau) d\tau \right) \quad (2)$$

Eq. (2) can be represented in a (p<sup>2</sup>,τ) diagram, as shown in fig. 2

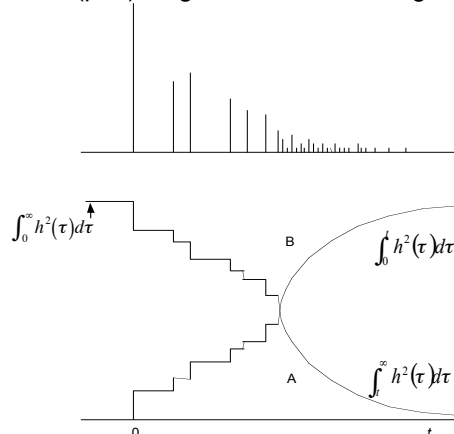


Fig. 2 - Schroeder plot as represented by Eq. (2)

### 2.3.2. Early Decay Time (EDT)

Since Jordan [4] demonstrated that the subjective perception of reverberation is correlated more strongly with the initial decay of the reverberant tail, he suggested to calculate the reverberation time from the decay range between 0 and -10 dB on the integrated Schroeder curve, in seconds.

### 2.3.3. Center Time $t_s$

It was defined by Kürer [5], as *Schwerpunktzeit*, in the following equation:

$$\tau_s = \frac{\int_0^{\infty} \tau h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (3)$$

It is the first-order momentum of the squared pressure impulse response, expressed in milliseconds.

### 2.3.4. Inter-Aural Cross Correlation (IACC-early)

As suggested by Ando [6], it is the normalized correlation coefficient between the first 50 ms of the pressure impulse responses measured at the two ears of the binaural microphone.

From the definition of the cross-correlation function, given by:

$$\rho(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{2T} \int_{-T}^T h_d(\tau) \cdot h_s(\tau + t) d\tau \right)}{\lim_{T \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^T h_d^2(\tau) d\tau \cdot \int_{-T}^T h_s^2(\tau + t) d\tau} \right)} \quad (4)$$

and taking into account that the limitations of the integral are set to 80 ms (Early), the IACC is defined as the maximum value of Eq. (4), that is,

$$IACC = |\rho(\tau)|_{MAX} \quad \text{Where } \tau \leq 1ms. \quad (5)$$

### 2.3.5. Strength (G)

It is the difference between the measured sound pressure level, and that produced by the same omnidirectional source in a free field, at 10-m distance from its center, and is expressed in decibels. It was defined in ISO 3382, and expressed in the following equation

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} h_{10}^2(\tau) d\tau} \quad (6)$$

### 2.3.6 Klarheitsmass or Clarity $C_{80}$ and $C_{50}$

It is defined [7] by the equation

$$C = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} h^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} h^2(\tau) d\tau} \quad (7)$$

When the clarity is related to the musical perception, as in this research, the time interval is limited to 80 ms, whereas if the clarity is related to speech, the time interval is set to 50 ms. Reichardt, Abdel Alim and Schmidt defined such an acoustic parameter in order to relate the “transparency” of the music to an energetic parameter.

### 2.3.7 Lateral Fraction LF

It is defined by the equation

$$LF = 10 \log \frac{\int_{5ms}^{80ms} h_{\infty}^2(\tau) d\tau}{\int_{0ms}^{80ms} h_o^2(\tau) d\tau} \quad (8)$$

In which  $h_{\infty}$  is the impulse response measured with a “velocity” microphone, pointing outside the left ear of the listener, and  $h_o$  is the normal omnidirectional impulse response. If a Soundfield microphone is employed (as in this case), the  $h_{\infty}$  is obtained by the channel labeled Y, and  $h_o$  is obtained by the channel labeled W, provided that this is amplified by 3 dB (as the soundfield microphone outputs an omnidirectional signal which has a gain reduced by 3 dB in comparison with the other three velocity channels XYZ).

### 2.3.8 Tonal Balance TB and Bass Ratio BR

These two parameters were defined by Beranek [8], and are actually NOT considered in the ISO3382 standard (together with ITDG). They are defined as ratios between the reverberation times T20 averaged over different frequency ranges:

$$TB = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{2000} + T_{4000}} \quad (9)$$

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \quad (10)$$

### 2.3.9 Comparison between the 5 theatres

A first comparison is obtained looking at the more traditional parameter, the reverberation time T20. Fig. 3 shows a comparative plot of the spectra of T20 for the 5 theatres employed in the preliminary test.

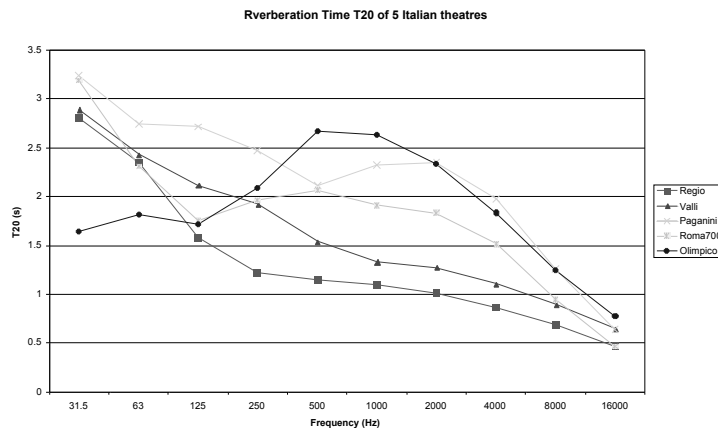


Fig. 3 - Reverberation time T20 of the theatres employed for the preliminary test

The following table reports the complete set of objective parameters, subsequently employed in the objective/subjective comparative analysis:

Param.	Regio	Valli	Paganini	Roma-700	Olimpico
C50 [dB]	1.82	7.48	-1.47	-2.45	0.03
C80 [dB]	4.93	9.28	0.81	0.83	1.20
D50 [%]	60	84	42	37	50
Ts [ms]	48	28	115	144	110
EDT [s]	1.08	1.26	2.09	1.98	2.43
T20 [s]	1.10	1.44	2.22	1.99	2.65
T30 [s]	1.11	1.55	2.24	1.99	2.64
LF	0.10	0.12	0.22	0.12	0.18
IACC (Early)	0.71	0.88	0.60	0.70	0.81
TB	1.47	1.70	1.20	1.11	0.91
BR	1.27	1.41	1.17	0.94	0.72

For the 9 ISO-3382 parameters, the average value between those in the 500 and 1000 Hz octave bands were taken. The last two parameters are already ratios between different frequency bands.

## 2.4 Listening tests

The questionnaire that we proposed is the fruit of a work made from Prof. A.Farina and Prof. L.Tronchin [1] in several years. From this work, a list of 9 couples of adjectives emerged, suitable for our tests: *“Pleasant-Unpleasant”, “Round-Sharp”, “Soft-Hard”, “Diffuse-Localisable”, “Detached-Enveloping”, “Dry-Reverberant”, “Treble boosted-Treble reduced”, “Bass boosted-Bass reduced”, “Quiet-Loud”*.

In order to facilitate the test we used a software that permit the switch between the theatres in real time listening a track, as shown in *Figure 4*.

We used for the test 17 subjects: they were musicians, singers, professors of Music Academy, audiophiles, music critics, musicologists.

Fig. 4 - Form for the listening test

## 2.5 Statistical Results

For a first simple analysis we used the approach of a linear regression. For every crossing of the objective-subjective matrix we found out the coefficient of linear regression ( $r$ ) and correlation. We assumed that for values of  $r$  higher than 0.3 the line starts to interpolate the points and consequently the objective parameter is at least partially correlated with the subjective one.

The following table contains the results of this linear correlation analysis for the orchestral music:

Coeff. Di Regressione Lineare ORCHESTRALI	C50	C80	D50	Ts	EDT	T20	T30	LF	IACC	TB	BR
Piacevole-Spiacevole	0,14	0,19	0,19	-0,24	-0,19	-0,20	-0,12	-0,21	0,16	-0,07	0,09
Rotondo-Spigoloso	<b>0,35</b>	<b>0,42</b>	<b>0,46</b>	<b>-0,51</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,37</b>	<b>-0,22</b>	<b>-0,51</b>	<b>0,32</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,15</b>
Morbido-Duro	0,17	<b>0,33</b>	0,28	<b>-0,45</b>	<b>-0,40</b>	<b>-0,39</b>	-0,19	<b>-0,35</b>	0,28	-0,11	0,13
Diffuso-Localizzabile	0,17	<b>0,30</b>	0,22	<b>-0,36</b>	<b>-0,35</b>	<b>-0,37</b>	-0,26	-0,25	0,26	0,02	0,21
Distaccato-Avvolgente	-0,17	-0,24	-0,19	0,23	0,16	0,19	0,09	0,21	-0,21	-0,02	-0,17
Secco-Rimbombante	-0,24	<b>-0,42</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,50</b>	<b>0,48</b>	<b>0,50</b>	<b>0,34</b>	<b>0,37</b>	<b>-0,36</b>	0,01	-0,26
Acuti Accentuati-Acuti Ridotti	-0,19	-0,28	<b>-0,35</b>	<b>0,45</b>	<b>0,31</b>	0,26	0,04	<b>0,44</b>	-0,22	<b>0,31</b>	0,02
Bassi Accentuati-Bassi Ridotti	0,22	0,29	<b>0,38</b>	<b>-0,48</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,32</b>	-0,18	<b>-0,46</b>	0,20	<b>-0,34</b>	-0,04
Sommesso-Sonor o	-0,08	-0,01	0,00	-0,11	-0,15	-0,09	-0,02	-0,05	-0,01	-0,12	-0,11

In this case the situation was not very bad, there are many values above an absolute value of 0.30, and some even above 0.50.

But, going to the music with song, we found only very few positive results, like a correlation for vocal tracks between pleasantness and T30 as shown in the picture (Fig. 5), but they were far below our expectations. The same pleasantness, in according with orchestral and vocal tracks, didn't correlate with any other of objective parameters.

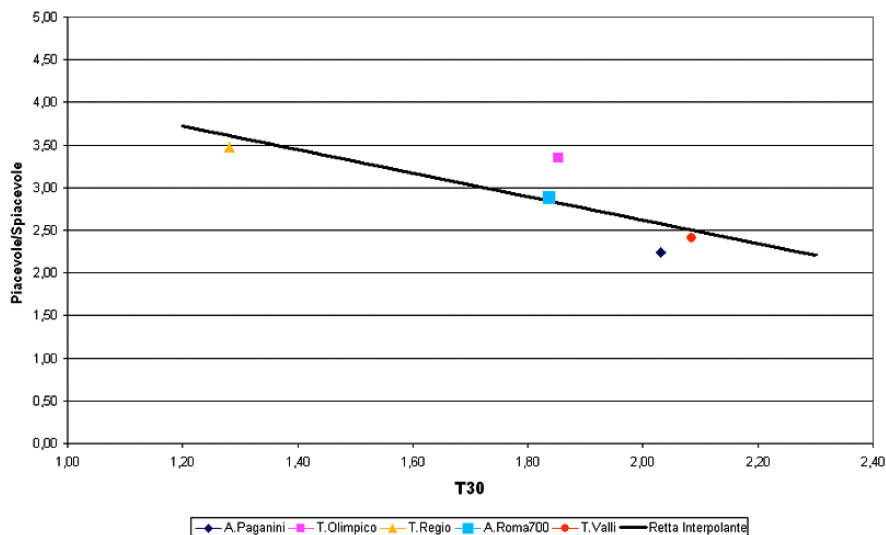


Fig. 5 - Correlation between Pleasant/Unpleasant and T30

For the orchestral tracks, the *Bass Ratio (BR)* didn't match with “*bass boosted – bass reduced*”: the cause of this effect could be the use of the additive subwoofer.

A possible cause of this large uncorrelation could be found in the use of headphones for some problems explained in next paragraphs. Another problem is given from the “objectivity” of objective parameters: they are affected by different methods of measurement. For this reason it came out the need of a comparison between different reproduction systems in order to find out the best for a listening test.

Finally, this basic statistical analysis method revealed all its limits, and in the future more advanced analysis schemes will be employed (Principal Component Analysis, Factor Analysis, Multivariate Regression).

### 3. SETUP OF A NEW ROOM FOR MULTI-SYSTEM LISTENING TESTS

#### 3.1 Acoustic treatment



The reproduction system was realized in a room inside the Casa della Musica in Parma. The room is parallelepiped shaped, the floor is 4.5 m x 3.2 m, the height 4.2 m.

The first step in definition of a hi-performance room is the acoustic treatment of the environment in order to obtain a suitable reverberation time and sufficiently flat frequency response. In theory any kind of virtual environment reproduction should take place in an anechoic room, for not adding any variation to the electronic signal, which should already describe the original environment: actually a completely anechoic ambience (beside being a very expensive solution) is not ideal, because of the odd sensation induced on the listener when music is off. So a little reverberation is suitable, but it should affect as little as possible the “timbre” and “dynamics” of the reproduced sound. Reverberation (reflections) and frequency response are strongly bound together, since frequency response is given by different interference pattern between direct field and reflections. The nature of this phenomenon is different at high and low frequencies. For high frequencies the ear analysis window is quite short and space variability rate is very high (short wavelength): hence the perceived frequency response depend just on very early reflection and can change with little receiver movement, roughly maintaining a space averaged flat frequency response, or variations depending on not flat absorbing coefficients of the walls; the later part of the impulse response is instead perceived as reverb (with a timber typical of that room), which as already said is acceptable if sufficiently short.

For low frequencies, instead, the ear analysis time window is longer and spatial variability is very low; so the effect of reflections is mainly to make the perceived direct field stronger and longer at particular frequencies, depending on room shape and dimensions, strongly affecting timber and dynamics; this is like to say that here the dominant phenomenon is stationary waves, or resonance. The medium range is characterized by a transition behaviour between the two already analyzed.

The high frequency behaviour is not difficult to control, traditional absorbing panels can help to reach a suitable reverb time and inverse filtering of the loudspeakers signal can improve the flatness of frequency in a particular listening area. That's what we did, as shown in figure 6, using glass wool end polyurethane foam.

For low frequency things get harder: is very difficult to damp the response of the room at low frequencies because surface roughness should be comparable with the wave length (some meters if we go below 200 Hz!). A typical partial solution is to put resonant open cavities in correspondence to point in which stationary waves have maximum amplitude, that is against the walls. As shown in figure 8, we adopted this technique using loudspeaker cases, cartoon boxes, and “home made” tube traps; also double side rigid and vertical absorbing panels put at a certain distance from the walls was used, to create a



Fig. 6 - Listening Room

kind of cavity, and horizontal ones hung at one meter from the ceiling. Electronic control of low frequency resonance is also a difficult task, because low frequency narrow band filters must be very long, and moreover the deep lack of energy between two resonant frequencies leads the filter to stress very much the speakers. Also diffusing panel were used (like the wooden one visible in Figure 6), which are of great help inhibiting resonances in the medium frequency range and making reverb more diffuse.

### 3.2 Speakers positioning

As a further trick for lowering resonance, the axis of symmetry of the loudspeaker array was not aligned with the room, nor was the listener positioned in the room's centre. Loudspeakers are at a distance of 1.5 m from the listening position. Three couple of loudspeakers are arranged as shown in figure 7 for implementing different kind of reproduction. Dynaudio self-powered studio monitors are used for the conventional stereophonic pair,  $\pm 30^\circ$  from the median plane. Genelec S30D self-powered loudspeakers are used for front stereo dipole, on their sides so that the tweeters were 22 cm apart, the mid-range drivers 43 cm apart, and the woofers 83 cm apart (measuring between driver centres). This corresponds to respective angles of  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ , and  $16^\circ$  from the median plane of symmetry (the angle seen by the subject between loudspeaker pairs is double these values). The rear stereo dipole pair are QSC AD-S82H passive loudspeakers, fed with a power amplifier, with driver centers separated by 45 cm, corresponding to a  $9^\circ$  angle from the midline. Last, Sennheiser HD580 headphones are available.

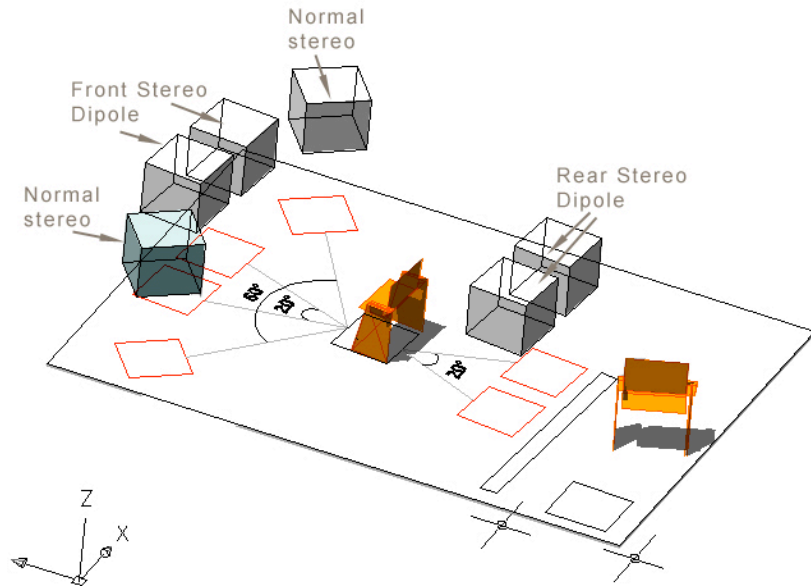


Fig. 7 - Disposition of the speakers inside the listening room

Sennheiser HD580 headphones are available. The rear stereo dipole pair are QSC AD-S82H passive loudspeakers, fed with a power amplifier, with driver centers separated by 45 cm, corresponding to a  $9^\circ$  angle from the midline. Last, Sennheiser HD580 headphones are available.

The final frequency response of the room is well described by the reverb time, shown in Figure 9. It is measured using the Genelec pair as test source and the dummy head as receiver: it's a matter of fact that the big increasing of energy at low frequency due to resonant modes can't be sufficiently damped.



Fig. 8 - Particular of the listening room

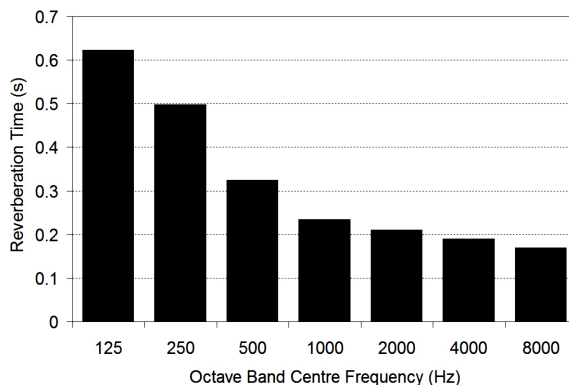


Fig. 9 - Reverberation Time of the listening room

## 4. Description of the three 2-channels reproduction systems

### 4.1. Recording

For describing the reproduction systems it's necessary to briefly introduce the corresponding recording methods. Headphones, stereo dipole and double stereo dipole are related to binaural recordings, which are made by means of two microphones capsules put inside the ears of a head, real or "dummy". The purpose of reproduction is in this case to reproduce the same sound pressure at the ears of the listener. The stereo pair is related with a more traditional kind of recording, the ORTF configurator: two closely-spaced directional (cardioid) microphones with a distance of 170mm and an angle of  $110^\circ$ .

The main goal of the apparatus is to reproduce the impulse responses (or the live recordings) made with our recording system, shown in *Figure 10*. It is composed by three microphone configurations rigidly bound together: a Soundfield microphone, a Neumann dummy head for binaural recording and the ORTF Neumann pair fixed above it. The off axis Soundfield microphone is oriented to other kind of multi channel reproduction. The whole system can rotate on a turn table.

The system can be employed both for recording and for impulse response (IR) measurement (using the advanced method of logarithmic sweep described in [9]). In this second case several measurement can be made at different angles by means of the turn table. This may be used for sound tracking or further multi channel reproduction methods.

In general IRs are convolved with one or more anechoic recordings, to reproduce the virtual situation of the recorded source playing in the measured environment, as if it was in the same position of the test source used for IR measurement.



Fig. 10 - Microphone system

## 4.2 Playback

In general, a “transparent” sound reproduction system is one which surpasses the “photocopy of the photocopy” test. This test is performed placing the same microphones originally employed for recording or measuring inside the concert halls at the exact position where the head of the listener will be inside the playback room.

Playing through the reproduction system the signals originally recorded in the room, and re-recording them again, we should find that this “second copy” is identical to the “first copy” taken in the concert hall.

However, this does not ensure, by itself, that the listener placed in the listening position will perceive exactly the same sound as if he was in the original theatre (we are confronting two copies, we do not have the original to compare with.....).

If, after the “second copy” measurement is done, this differs from the “first copy”, then it is necessary to introduce in the reproduction chain a set of digital filters, designed with the goal to make the reproduction system fully transparent in terms explained above.

In the following subchapters we will see how these inverse filters are designed for reproduction systems with and without cross-talk.

### 4.2.1 Headphones

Stereo headphones are the more intuitive tool for reproducing binaural recording. They should put the right pressure directly where it was recorded, at the ears, maintaining the separation between the two (no “cross talk”) and not being affected by the room response. For achieving this target usually the transfer function from the headphones signal to the inner ear is measured, using the same dummy head (Neumann) used for recording; then two inverse filtering are calculated and applied at the binaural signal to make this path transparent, and reproduce exactly the signal recorded at the inner ear.

Reproduction would be very realistic if the head used for recording (or IR measurement) was the same of the listener head. For obvious reasons it is necessary to use a standard dummy head for recording, and this affects the reproduction in a non negligible way.

More over, the fact that the sound image reproduced is rigidly bound to eventual little movement of the listener head, plus the fact of wearing an object on the head which shield the listener from the natural external background noise, represents psychoacoustic negative artifacts.

4.2.2 Stereo dipole

Stereo dipole aim is to recreate the correct sound signal at the two listener ears through a system of two loudspeakers, each fed with a processed version of the original binaural system, exploiting the technique of cross talk cancellation.

This technique (see Figure 11) uses a two by two matrix of (four) filters, calculated so that the system cancels the contribution of the left speakers to the right ear and viceversa. This matrix H is obtained inverting the original matrix of transfer function from speakers to ears C previously measured.

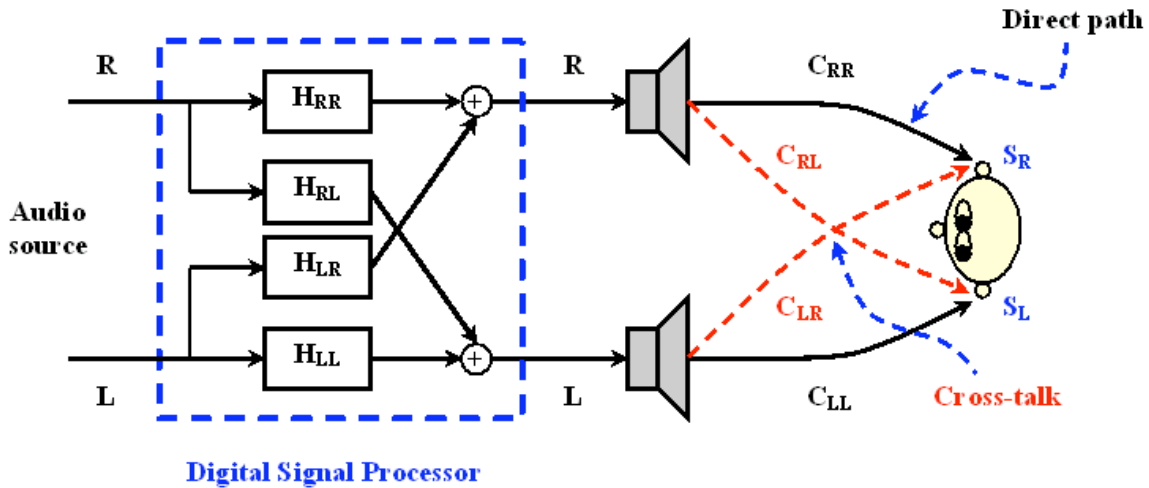


Fig. 11 – Scheme of Stereo Dipole

Kirkeby et al (1998) found that a configuration with a 10° interval between loudspeakers as seen by the listener minimises the ringing artefacts in the cross-talk cancellation filters, and expands the area in which the cross-talk cancellation is effective (allowing greater listener head movement).

This method gives of course a more natural sensation, not relying to a strange and close source like a headphones pair is. More over, the portion of sound coming from the front (in most recordings coincident with the direct field of a source) is spatially correctly reproduced, not only in the neighborhood of the ears, but on a wider area, inducing a natural spaciousness sensation when slightly moving the head.

Our speaker configuration, as described in the previous paragraph, shows an angle between tweeters which is a little narrower than 10°, and a wider one between woofers. According to us this should provide for a better synthesis of the front plane waves and a better separation between the ears of low frequencies.

4.2.3 Double stereo dipole

The double stereo dipole adds a rear pair to the normal stereo dipole configuration. The processing is made of two dipole matrix for H-front and H-rear, calculated inverting independently the two direct matrix C-front and C-rear.

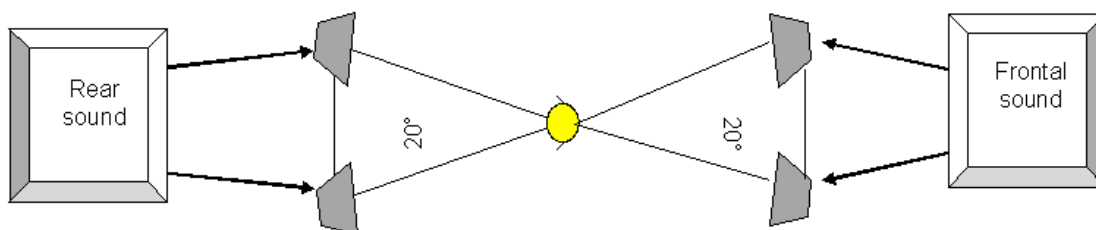


Fig. 12 – Dual Stereo Dipole system

With this approach, the ear pressure induced by the two stereo dipole, front and rear, should be exactly the same in ideal conditions (listener head coincident with measurement head, listener head perfectly positioned and still, ideal reproduction environment); in real conditions instead the double stereo dipole provides also for sound coming from behind the same advantages, previously described,

which the single dipole gives only for sound coming frontally: hence it is supposed to be more realistic in situations in which rear sound is particularly important (i.e. in a theatre, strong rear reflection or applause).

#### 4.2.4 Normal Stereo

In the normal stereo the sound picked up by the two cardioid microphones is fed to a pair of speakers forming an angle of  $\pm 30^\circ$  (there are possible variation) with the symmetry axis with respect to the listener.

An inverse filtering may be done to flatten the response of the speakers, but, differently from the stereo dipole case, no filtering is performed for cancelling the cross-talk paths.

In this case the only spatial characteristic considered in the recording stage is sound direction, and with a very low angular resolution. The aim here is to discriminate in a very simple and reliable way the sound coming from the front in two principal contributions, left and right. The system is not supposed to give a realistic sensation about the specific spatial characteristic of the environment response, but just an idea of the frontal figure of direct field and first reflections and the temporal shape of reverberation tail, unless it has not particular characteristic of non isotropy.

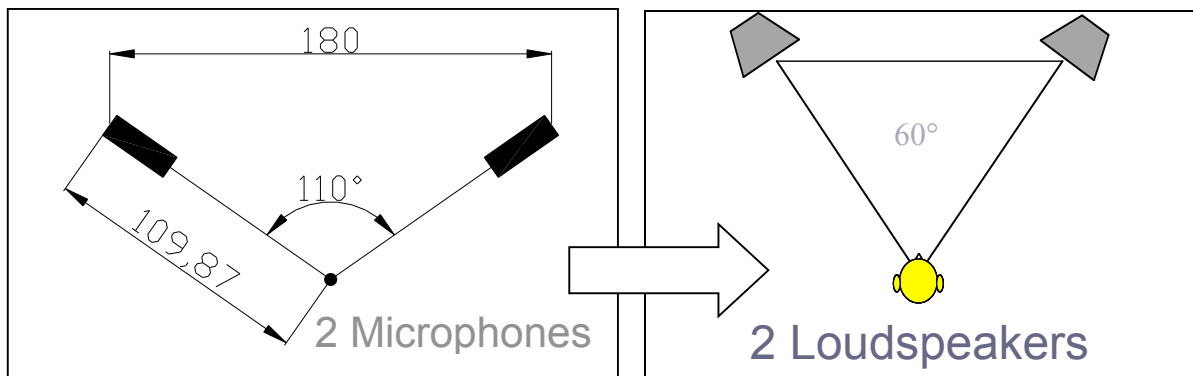


Fig. 13 – ORTF Stereo system

## 5. COMPUTATION OF THE INVERSE FILTERS

As shown in the previous chapters, any of the recording/reproduction system always requires the insertion of a set of numerical filters (we usually use FIR filters, due to the possibility to implement them very efficiently on modern hardware, and to the fact that designing their sets of coefficients is easier than with other architectures, such as IIR or Warped FIR).

In this chapter we explain the method employed for designing these inverse filters, both for single-input – single-output cases (such as for headphones or normal stereo), or for cross-talk cancelling cases (single and double stereo dipole).

### 5.1 Kirkeby inversion of a single-input, single-output system

We start with a measurement of one actuator-microphone system, for example obtained placing the headphones over the dummy head, and measuring separately the left-left transfer function (then everything will be repeated identical for the right-right). There are not cross-talk paths in this case.

Figure 14 shows the headphones over the dummy head during this measurement.



Fig. 14 – dummy head and headphones

The result of the measurement is a single impulse response,  $h$ . We want to find another impulse response (typically longer than  $h$ , usually twice long), named  $f$ , so that the convolution of  $h$  with  $f$  is a

perfect Dirac's Delta function  $\delta$ . This is expressed as follows, both in time-domain and in frequency-domain:

$$f \otimes h = \delta \quad FFT(f) \cdot FFT(h) = FFT(\delta) \quad (11)$$

As in frequency domain the convolution becomes a simple multiplication, to be performed independently for each spectral line, it appears to be advisable to get the searched filter  $f$  simply making the reciprocal of the complex spectrum of the measured transfer function  $h$ :

$$FFT(f) = \frac{1}{FFT(h)} \quad (12)$$

Unfortunately, this simple approach does not work. In fact, in general  $h$  is "mixed phase", and does not admits a direct inversion. Only approximate inversion method can provide an inverse filter  $f$  which is stable, causal and of finite length, as required here.

Among various available approximate inversion methods, we did choose the Kirkeby-Nelson [10] inversion, and adapted it with further modification. In practice, the original method was based on taking the reciprocal in frequency domain but adding a small regularization quantity  $\varepsilon$  at the denominator:

$$FFT(f) = \frac{FFT^*(h)}{FFT^*(h) \cdot FFT(h) + \varepsilon} \quad (13)$$

The value of  $\varepsilon$  has to be chosen with a trial-and-error approach, as it defines a compromise between the length of the inverse filter and the accurate inversion of the spectral peaks and dips.

In general, it is difficult to find a value of  $\varepsilon$  suitable for the complete wide-band inversion of a transducer-microphone pair, and the results, although stable and workable, are never optimal.

So we modified the original approach, making  $\varepsilon$  variable with frequency. The idea is to use a small value of  $\varepsilon$  in the central frequency range, where we want a very accurate inversion, and instead release the things at extremely low and high frequency, where there is no chance to control the transducers anymore, and where the human hearing is less sensitive to errors.

In practice, a suitable spectral variation of  $\varepsilon$  is as shown in figure15.

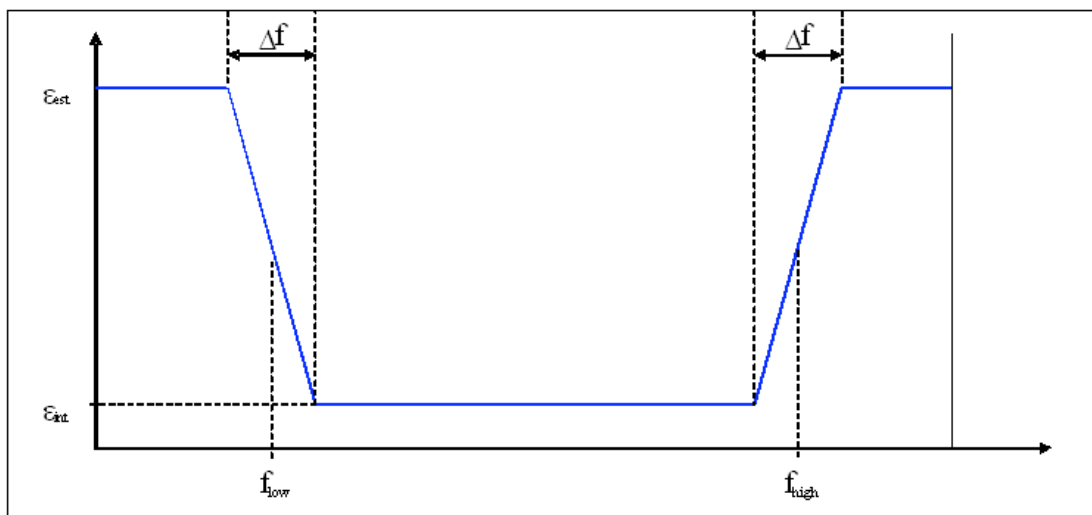


Fig. 15 – regularization parameter varying with frequency

In practice, usually the frequency limits  $f_{low}$  and  $f_{high}$  are chosen in correspondence of the declared frequency limits of the reproduction hardware. For the Sennheiser headphones shown in the previous figure 14, these limits were set to 40 Hz and 16000 Hz respectively.

Outside this frequency range, a value of  $\varepsilon$  typically 10 times greater the one used inside the range is used.

### 5.1 Kirkeby inversion of a cross-talk stereo system

The following fig. 16 shows the cross-talk phenomenon in the reproduction space:

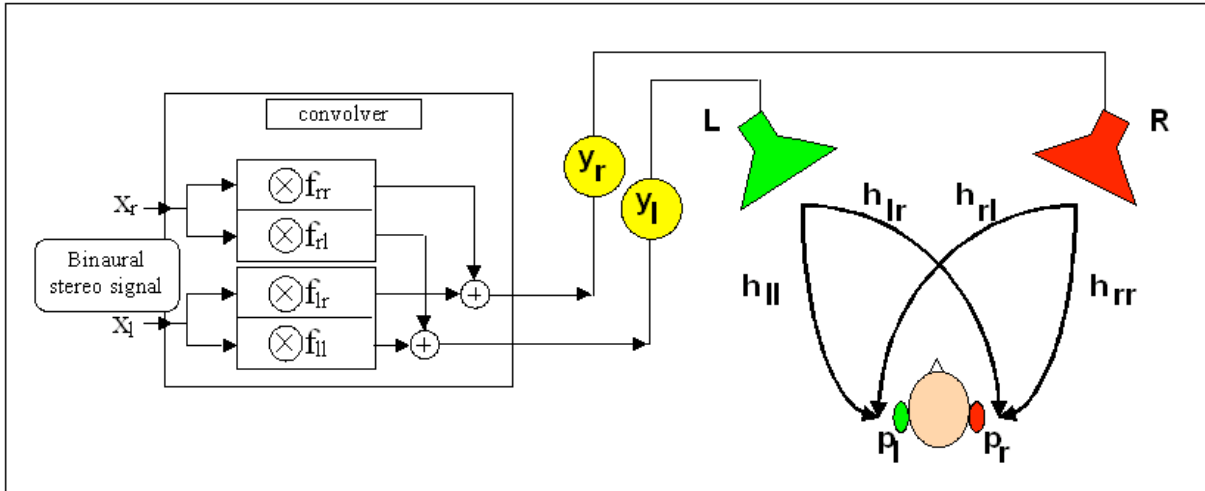


Fig. 16 – cross-talk cancelling scheme

The 4 cross-talk cancelling filters  $f$ , which are convolved with the original binaural material, have to be designed so that the signal collected at the ears of the listener are identical to the original signals. Imposing that  $p_l = x_l$  and  $p_r = x_r$ , a 4x4 linear equation system is obtained. Its solution yields:

$$\begin{cases} f_{ll} = (h_{rr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{lr} = (-h_{lr}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rl} = (-h_{rl}) \otimes \text{InvDen} \\ f_{rr} = (h_{ll}) \otimes \text{InvDen} \\ \text{InvDen} = \text{InvFilter}(h_{ll} \otimes h_{rr} - h_{lr} \otimes h_{rl}) \end{cases} \quad (14)$$

The problem is the computation of the InvFilter (denominator), as its argument is generally a mixed-phase function. In the past, the authors attempted [11] to perform such an inversion employing the approximate methods suggested by Neely&Allen [12] and Mourjopoulos [13], but now the Kirkeby-Nelson frequency-domain regularization method is preferentially employed, due to its speed and robustness. A further adaptation over the previously published work [14] consists in the adoption of a frequency-dependent regularisation parameter. In practice, the denominator is directly computed in the frequency domain, where the convolutions are simply multiplications, with the following formula:

$$C(\omega) = \text{FFT}(h_{ll}) \cdot \text{FFT}(h_{rr}) - \text{FFT}(h_{lr}) \cdot \text{FFT}(h_{rl}) \quad (15)$$

Then, the complex inverse of it is taken, adding a small, frequency-dependent regularization parameter:

$$\text{InvDen}(\omega) = \frac{\text{Conj}[C(\omega)]}{\text{Conj}[C(\omega)] \cdot C(\omega) + \varepsilon(\omega)} \quad (16)$$

In practice,  $\varepsilon(\omega)$  is chosen with a constant, small value in the useful frequency range of the loudspeakers employed for reproduction (80 – 16k Hz in this case), and a much larger value outside the useful range. A smooth, logarithmic transition between the two values is interpolated over a transition band of 1/3 octave.

Fig. 17 shows the user's interface of the software developed for computing the cross-talk canceling filters:

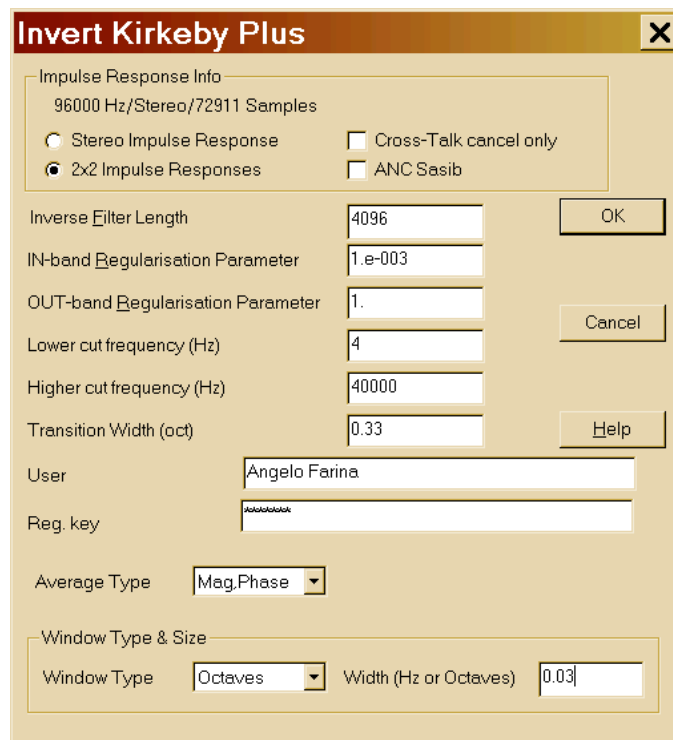


Fig. 17 – user's interface of the inverse filter module

This software tool was implemented as a plug-in for Adobe Audition (formerly known as CoolEdit), and it can process directly a stereo impulse response (assuming a symmetrical setup, so that  $h_{ll}=h_{rr}$  and  $h_{lr}=h_{rl}$ ), or a complete 2x2 impulse responses set, obtained placing first the binaural IR coming from the left loudspeaker, followed in time by the binaural IR coming from the right loudspeaker. In both cases, the outputted inverse filters are in the same format as the input IRs.

The computation is so fast (less than 100 ms) that it is easy to find the optimal values for the regularisation parameters by an error-and-trial method.

## 6. HARDWARE AND SOFTWARE

In order to compare all the four system at the same time, a special audio networking was developed. A notebook located in listening position was connected to a Soundcard, EDIROL 101 Firewire Capture Interface, and its four analogue output channel pairs are used to drive the four reproduction systems already described. So, using the special software described later, it is possible to select in real-time any of the 4 reproduction systems, and routing to it automatically the proper recording (O.R.T.F or dummy head).

The notebook contains the stereo recordings made with the ORTF microphones and with the dummy head, or the equivalent ORTF and binaural tracks obtained with a previous off-line convolution of an anechoic track with ORTF and binaural measured impulse responses. The stereo ORTF track is send to the stereo output which feeds the normal stereo loudspeakers, while the binaural track is sent on one of the three stereo outputs, connected respectively to headphones, stereo dipole and double stereo dipole systems. All the 8 output channel (4 stereo pairs) are connected to a separate PC, equipped with the Ardvaark Q10 audio interface, which provides for 4 stereo high quality input and output pairs.

The I/O is done at 24 bits, 96kHz, and all the processing, filtering, etc. is performed in floating-point with 32-bits precision.



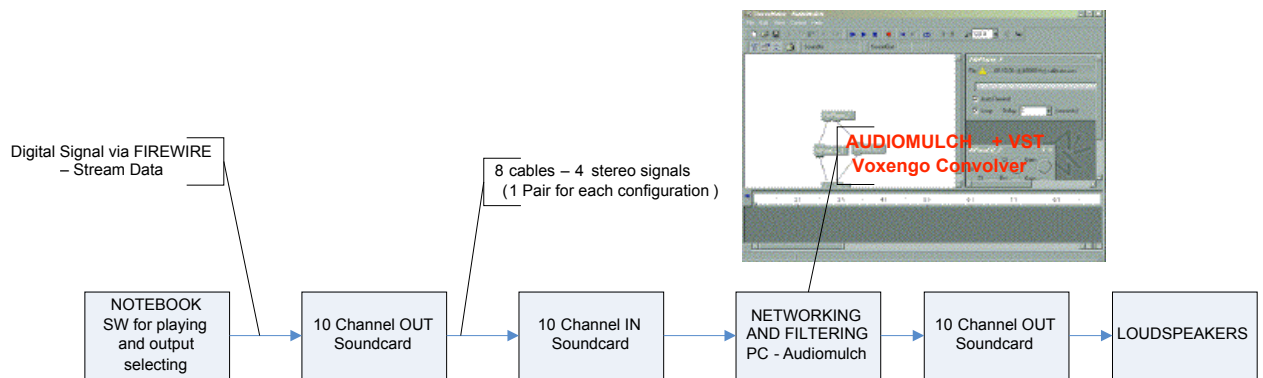


Fig. 18 - Chain of reproduction

The four stereo inputs of the Aadvark sound card receive the four stereo outputs coming from the notebook + EDIROL system. The four stereo channels pass through an application called Audiomulch: it is a multichannel VST host, inside which two instances of a plug-in called Voxengo Pristine Space are inserted. Pristine Space is a system able to handle multi-channel convolution of up to 8 incoming signals with up to 8 FIR filters.

Hence, setting in Audiomulch four stereo filtering configurations linked respectively to the four stereo pairs of the Q10, we drive separately the four reproduction systems. After being filtered each signal pair is send to correct Q10 outputs, connected to the corresponding loudspeakers. So this hardware-software tool made of PC, Q10, Audiomulch and Voxengo act as a four chanFor headphones, normal stereo, and stereo dipole, each input stereo pairs drives a single stereo output. In the case of the dual-stereo-dipole system, however, the input stereo pair is filtered with two independent sets of FIR filters, and drives two stereo outputs, one feeding the frontal stereo dipole, the second feeding the rear stereo dipole.

This long connection path is synthesized in the scheme in Figure 18.

It would be more clever to use just a single PC and a single multichannel sound card. But this would require a software solution capable of re-routing the outputs of an application as inputs to a second one. Although these software tools are existent nowadays, the system was not setup in this way yet, mainly for reasons of time, and for the fact that the computing power required would be too much for the low-end notebook employed as playback device.

The filters implemented in Audiomulch with the 2 instances of Voxengo Pristine Space are

1. the cross cancellation filters (2 by 2 matrix) for the frontal and rear stereo dipoles, which also automatically provide for flattening the response of the speakers employed (the first instance of Pristine Space has 2 inputs, 4 outputs and 8 FIR filters)
2. simple stereo inverse filters for headphones and normal stereo, which, as already explained, flatten the transfer function from headphones to ears, and for normal stereo flatten the loudspeaker's response (the second instance of Pristine Space has 4 inputs, 4 outputs and 4 FIR filters).

All these inverse filters were preliminarily designed, starting by measurement of the direct impulse responses. The details of the inversion were explained in chapter 6.

In all of these inversions the impulse responses are truncated just after the direct sound pulse: trying to invert also the residual contributions of the room response revealed to cause more problems

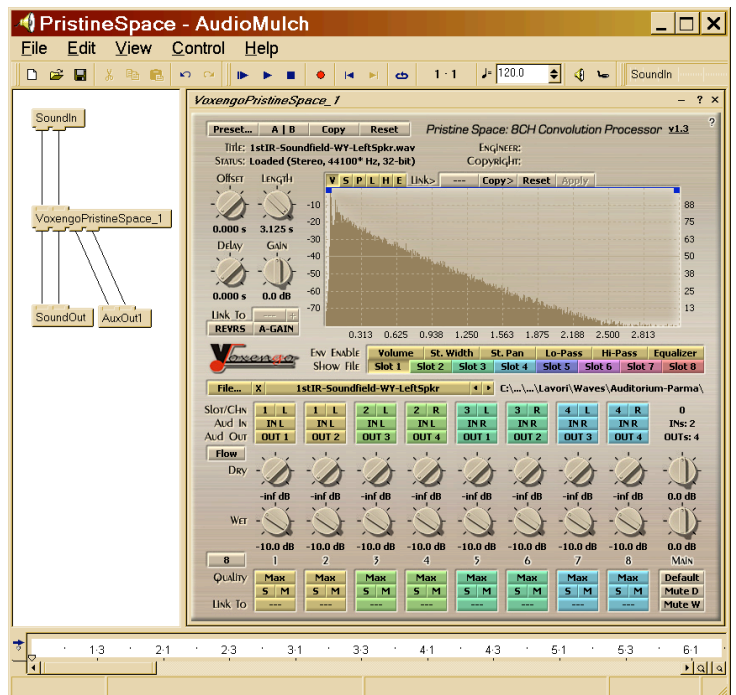


Fig. 19 – A simple dual cross-talk canceling network with AudioMulch and Pristine Space

than those which are solved, and makes the system very unstable and not robust to listener movement.

Inverting only the direct sound has also other advantages:

1. The inverse filters are short (8192 coefficients at 96 kHz), so there is no problem for the PC to convolve 12 of these filters simultaneously employing just a fraction of the available computing power.
2. The latency of the convolver is short too, so that when the listener switches the sound sample, he hears immediately the new sound.
3. Modifications of the fittings of the room (which is continuously improved) do not require creating a new set of inverse filters.

Finally, it must be remarked here that the Voxengo Pristine Space convolver revealed to be very versatile, as it already contains the possibility to sum (mix) together the results of the convolutions before feeding the outputs. This revealed to be precious for implementing the cross-talk cancellation networks. This convolver revealed also very good performances in terms of CPU usage and latency, outperforming our Aurora convolution plugin, which simply could not stand up in comparison.

## 7. COMPARATIVE LISTENING TEST

Aim of this test session is to investigate comparatively the capabilities of the four systems to reproduce with realism the acoustic of a theatre. In order to make this comparison an anechoic track of an accordion was convolved with Binaural and ORTF Impulse Response recorded in five Auditoria and in different positions in the stalls. The software that we designed (*Figure 20*) permits to switch between ten acoustic situations: every situation is different from the other for position in the stalls, system of reproduction, theatre. This means that choosing one of the numbered buttons the software plays the binaural track or the ORTF one, selecting the correspondent output of the Edirol soundcard as explained in the proevious paragraph.

Pressing another button, the track doesn't restart but continues playback giving the impression of a virtual "jump" between the theatres.

The subject has to answer to three questions. The first is about the perception of the room's dimension with an evaluation between *Small* and *Very Big*, the second is about the realism of the sound that the subject is earing and the third asks for the distance in meters of the accordion that is playing.

Till now we tested 24 subjects, all of them musicians or musically trained people.

The results of this test will be published in a nearly future, after proper statistical analysis of the results.

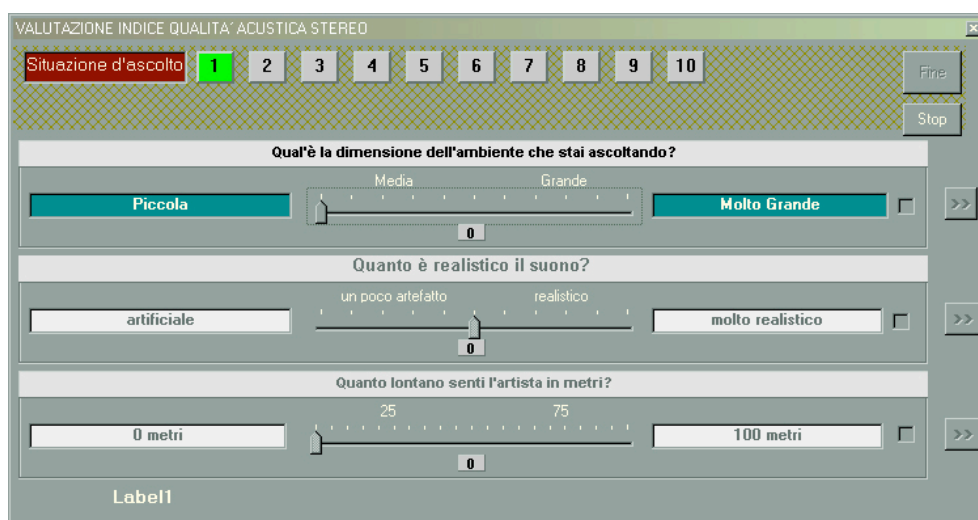


Fig. 20 - Software for the new listening test

## 8. CONCLUSIONS

A listening room equipped with three pairs of loudspeakers and one of headphones has been set up, and a lot of effort has been spent to design the filters for flattening the loudspeakers and to treat the room with passive and active means.

A complex hardware/software system has been developed, for allowing instantaneous switching between the 4 reproduction systems, and implementing the proper real-time digital filtering for each of them, so that the computer only needs to play the original soundtracks.

The system also features an easy user's interface, allowing for automatic collection of questionnaires, and giving to the subject the freedom to jump at will among the sound samples, re-listening to what he wants, and switching back and forth for A-B comparisons.

The goal is to rank the capabilities of the four systems to reproduce the spatial characteristics of the real acoustical spaces, by means of subjective tests which are currently going on. This should bring to the selection of the "optimal" playback system, which will be subsequently employed for other campaigns of listening tests.

The first future work is to repeat the tests for objective-subjective parameters correlation, using the system which will reveal to be the best one for reproducing frontal performances in theatre.

Then the study of reproduction quality versus system employed will be extended to more advanced multi channel systems, i.e. Ambisonics and Ambiophonics, and to sound samples including music, song and speech.

## 9. REFERENCES

- [1] A. Farina, "Acoustic quality of theatres: correlation between experimental measures and subjective evaluations", *Applied Acoustics*, Volume 62, Issue 8, Pages 889-1023 (August 2001).
- [2] The Aurora software plugins – [HTTP://www.aurora-plugins.com](http://www.aurora-plugins.com)
- [3] M. Schroeder, "New method of measuring reverberation time", *Journal of Acoustical Society of America*, 37, 409-412 (1965)
- [4] V.L. Jordan, "A group of objective acoustical criteria for concert halls", *Applied Acoustics*, 14 (1981)
- [5] R. Kürer, "Zur gewinnung von eizahlkriterien bei impulsmessungeg in der raumakustik", *Acustica*, 21 (1969)
- [6] Y. Ando, "Concert Hall Acoustics", Springer - Verlag, Berlin, 1985
- [7] W. Reichardt, O. Abel Alim, W. Schmidt "Definition und Meßgrunglage eines objectiven Maßes zur Ermittlungder Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei musikdarbietung" *Acustica*, 32 126 (1975)
- [8] L. Beranek, "Music, acoustics and architecture" John Wiley & Sons, New York (1962)
- [9] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique", 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [10] O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada, "The "Stereo Dipole"-A Virtual Source Imaging System Using Two Closely Spaced Loudspeakers" – *JAES* vol. 46, n. 5, 1998 May, pp. 387-395.
- [11] A. Farina, F. Righini, 'Software implementation of an MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering', Pre-prints of the 103rd AES Convention, New York, 26-29 September 1997.
- [12] S.T. Neely, J.B. Allen, 'Invertibility of a room impulse response', *J.A.S.A.*, vol. 66, pp.165-169 (1979).
- [13] J.N. Mourjopoulos, "Digital Equalization of Room Acoustics", *JAES* vol. 42, n. 11, 1994 November, pp. 884-900.
- [14] A. Farina, E. Ugolotti - "Spatial Equalization of sound systems in cars" - Proc. of 15th AES Conference "Audio, Acoustics & Small Spaces", Copenhagen, Denmark, 31/10-2/11 1998.

# MÉTODO HÍBRIDO PARA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ACÚSTICA DE SALAS: TEORIA, IMPLANTAÇÃO COMPUTACIONAL E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

**Roberto Aizik Tenenbaum & Thiago Schaaf Camilo**

Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

rtenenbaum@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo: A simulação numérica de acústica de salas tem sido um dos mais importantes enfoques de pesquisa em acústica de salas. Suas principais vantagens, comparando-se à simulação por modelo reduzido, são o baixo custo, a rapidez na modelagem e remodelagem da sala e no tratamento de resultados. Este artigo apresenta um novo código computacional, denominado RAIOS 3, para predição numérica de acústica de salas, baseado na combinação de dois consagrados métodos numéricos. Esse modelo híbrido consiste na utilização do método de traçado de raios para simulação das reflexões especulares e do método de transição de energia modificado para simulação das reflexões difusas. O desempenho do modelo é avaliado, a partir dos resultados obtidos com uma sala padrão e validado experimentalmente na intercomparação com diversos outros softwares participantes, no Round Robin 3, promovido pelo PTB, Alemanha. Nessa comparação entre programas de simulação numérica, realizada em três fases de crescente complexidade, participam cerca de vinte concorrentes, dentre os quais alguns dos melhores programas comerciais de acústica de salas. O programa RAIOS 3 atingiu ótimos resultados, demonstrando a eficácia do modelo adotado e excepcional confiabilidade para aplicação prática.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o recente crescimento da capacidade dos processadores, os computadores se tornaram capazes de calcular os mais diversos e complexos efeitos da propagação de ondas sonoras. Métodos numéricos transportam a realidade física para a linguagem computacional e, por isso, analisá-los detalhadamente se tornou uma necessidade. Os métodos mais consagrados são o de traçado de raios<sup>1</sup> o das imagens ou das fontes virtuais,<sup>2</sup> o de traçado de cones ou de pirâmides<sup>3</sup> e o de transição de energia.<sup>4</sup> Visto que a acústica de uma sala envolve vários fenômenos pertinentes à propagação do som, como a reflexão, a absorção, a difusão, a difração, a transmissão e a interferência, sua predição correta nem sempre pode ser atingida utilizando-se apenas um dos métodos numéricos citados acima. Por essa razão, experimentos numéricos incorporando combinações destes têm sido realizados criando-se novos modelos de simulação, que são chamados métodos híbridos.<sup>5,6</sup> Nos códigos computacionais para simulação acústica atualmente disponíveis essa filosofia tem sido adotada, embora nem sempre com o devido cuidado. Além da modelagem da propagação sonora, deve-se também modelar adequadamente outros elementos tais como fontes, receptores e superfícies de contorno da sala.

Uma das preocupações deste trabalho é focar na adequação dos modelos matemático-numéricos desses elementos à realidade física e à capacidade computacional atualmente existente. A título de exemplo, os modelos para fontes sonoras devem contemplar sua densidade espectral de potência. Usualmente, os programas modelam o conteúdo espectral da fonte pelo seu espectro de potência, discretizado em bandas de oitava. Essa discretização se encaixa com as aproximações propostas pelas normas, atinge taxas de erros satisfatórias e reduz consideravelmente o tempo de processamento, constituindo portanto uma modelagem adequada para fontes sonoras.

Um dos mais interessantes enfoques de pesquisa na área de acústica tem sido o fenômeno do espalhamento, também chamado difusão – embora não sejam, a rigor, a mesma coisa. Diversos experimentos subjetivos comprovam a importância desse fenômeno na qualidade acústica de um ambiente.<sup>7,8,9</sup> Acompanhando esses resultados, várias medições têm sido realizadas com o objetivo de compreender e modelar o fenômeno da difusão.<sup>10,11,12,13,14,15,16</sup> Atualmente, existem duas normas padronizando dois dos coeficientes que a quantificam. O primeiro deles é o coeficiente de espalhamento, definido pela norma ISO/WD 17487 (2001),<sup>17</sup> que determina a parcela de energia que é espalhada por direções distintas da reflexão especular. Baseada em um trabalho de Mommertz e Vorländer,<sup>10</sup> esse coeficiente tem sido largamente adotado e mensurado para diversos materiais. O

segundo é chamado de coeficiente de difusão e é definido pela norma AES-4id-2001 (2001).<sup>19</sup> Esse coeficiente expressa o grau de uniformidade da distribuição angular da energia sonora espalhada.

Diversas tentativas de viabilizar a simulação das reflexões difusas têm sido implementadas, muitas vezes sem sucesso. Com esse objetivo decidiu-se desenvolver um método híbrido capaz de calcular essas reflexões com a maior precisão possível, dentro das limitações computacionais atuais. O traçado de raios é adotado para a simulação das reflexões especulares, enquanto um método de transição de energia modificado é utilizado para a simulação das reflexões difusas.

Dois métodos de simulação numérica serão discutidos, portanto, neste trabalho. O primeiro a ser apresentado será o método de traçado de raios e o segundo será o método de transição de energia. O principal objetivo desses métodos é encontrar a resposta impulsiva virtual da sala, da qual obtêm-se seus principais parâmetros acústicos. A utilização do método de traçado de raios para a simulação das reflexões especulares e a adoção do método de transição de energia para a simulação das reflexões difusas será discutida e testada através do código computacional desenvolvido, denominado RAIOS 3.

## 2. MÉTODO DO TRAÇADO DE RAIOS

Nesse método, a modelagem da onda sonora admite os pressupostos da acústica geométrica \_ essencialmente os mesmos da ótica geométrica \_ que admite raios acústicos retilíneos radiando a partir da fonte sonora. Cada um desses raios possui as informações do espectro de potência e da distância percorrida pela onda. Propagando-se em linha reta o raio vai sendo submetido aos efeitos dissipativos causados pela viscosidade do meio (ar) e pelas superfícies de contorno da sala, que incluem os fenômenos de absorção, reflexão especular e reflexão difusa. Chama-se especular a reflexão que obedece a lei de Snell, isto é, o raio incidente, a normal à superfície e o raio refletido por esta estão no mesmo plano, com o ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência, como indica a Fig. 1. Qualquer parcela da energia da onda sonora que se espalha propagando-se por direções distintas da especular é considerada como reflexão não-especular, ou reflexão difusa.

### 2.1. Modelagem da Fonte

Emitindo-se um grande número de raios em todas as direções e modulando seu espectro de potência segundo sua direcionalidade, temos uma fonte virtual direcional, análoga às fontes reais. Vários modelos são propostos para se obter o máximo de homogeneidade na distribuição angular dos raios emitidos pela fonte. A modelagem para a fonte que apresenta os melhores resultados, segundo esse critério, se baseia na subdivisão geodésica do icosaedro regular. Cada uma das suas faces triangulares originais é subdividida recursivamente em novos triângulos, aproximadamente equiláteros. Esse processo de subdivisão é ilustrado na Fig. 2 e seu algoritmo é descrito por Lewer.<sup>5</sup> Após um número  $n$  de subdivisões das arestas do icosaedro, obtemos um número  $V$  de vértices igual a

$$V = 2 + 10 \cdot n^2. \quad (1)$$

A partir da projeção desses vértices em uma superfície esférica de raio unitário concêntrica ao icosaedro, obtemos os cosenos diretores dos raios que serão emitidos. A Fig. 3 ilustra um dos triângulos do icosaedro após 65 subdivisões e nos mostra uma excelente homogeneidade, mesmo para poucos pontos (~40 k).

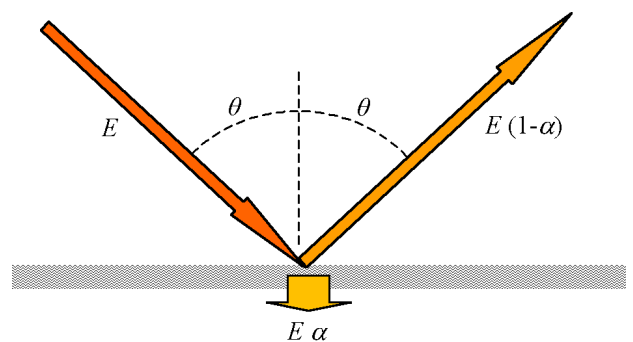


Figura 1: Reflexão especular

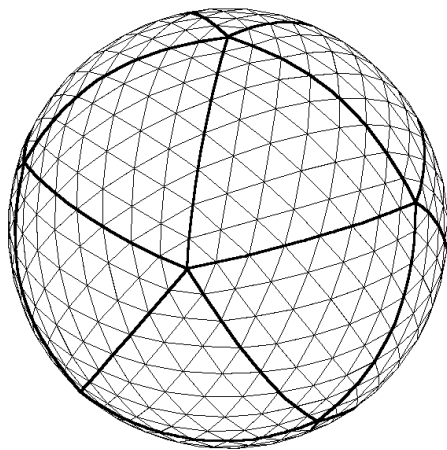


Figura 3: Subdivisão sobre um dos triângulos originais do icosaedro (n = 65)

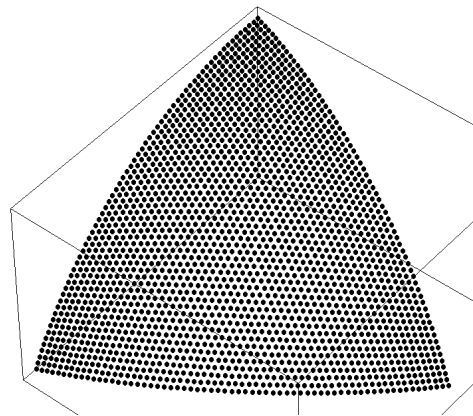


Figura 2: Subdivisão a partir do icosaedro (n = 8)

## 2.2. Modelagem das Reflexões

Outro fenômeno que devemos dar atenção no modelo numérico é o da reflexão do raio acústico sobre uma superfície. O modelo proposto por Mommertz e Vorländer,<sup>10</sup> no qual se baseia a norma ISO/WD 1747 (2001)<sup>11</sup> introduz o coeficiente de espalhamento,  $\delta$ , que quantifica a parcela da energia refletida difusamente. Esse coeficiente varia de zero, para reflexão puramente especular, a um, para reflexão completamente difusa.

Não é recomendável, contudo, a aplicação do método de traçado de raios para a simulação de espalhamento, uma vez que esse fenômeno sugere que um raio se subdivida em diversos outros novos raios. Para se obter uma predição precisa seria necessário que cada raio gerasse centenas de milhares de outros no momento de sua reflexão. Isso nos leva a um crescimento exponencial do número de raios, exigindo alta capacidade de armazenamento de dados e de processamento, restringindo portanto a utilização do método. A utilização clássica do método de traçado de raios se restringe portanto apenas ao cálculo das reflexões especulares, inserindo nestas toda a energia associada às reflexões difusas, ou seja, fazendo  $\delta = 0$ .

Na Fig. 1,  $E$  representa a energia transportada pelo raio. Para o cálculo da resposta impulsiva essa energia está distribuída em um pulso, e para o cálculo da distribuição da pressão sonora em regime permanente essa energia está distribuída uniformemente por unidade de tempo. Em ambos os casos, a energia do raio após várias reflexões é calculada pela expressão

$$E = \frac{E_F}{N_R} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (2)$$

onde  $E_F$  é a energia total emitida pela fonte,  $N_R$  é o número de raios,  $D_{\alpha\beta}$  é a direcionalidade da fonte,  $\alpha$  e  $\beta$  descrevem as coordenadas esféricas,  $\gamma$  é o coeficiente de absorção do ar,  $d$  é a distância percorrida pelo raio e  $\alpha_i$  é o coeficiente de absorção da superfície  $i$ . Para fontes onidirecionais, naturalmente,  $D_{\alpha\beta} = 1$ .

## 3. MÉTODO DA TRANSIÇÃO DE ENERGIA

Esse método é também chamado de método dos caminhos aleatórios, da radiosidade ou ainda método dos pacotes de energia. Ele se baseia na troca de energia sonora entre as superfícies em intervalos regulares de tempo, iguais ao tempo característico da sala, ou seja,  $\tau = 4V/cS$ . Esse intervalo é também chamado de tempo de transição. Corresponde ao tempo despendido pela onda sonora para percorrer o livre caminho médio da sala, ou seja,  $l_m = c \tau = 4V/S$ , onde  $V$  é o volume da sala e  $S$  a superfície total de seu contorno.

### 3.1. Modelagem da Fonte

A idéia central do modelo é que todas as superfícies irradiam som para todas as restantes na proporção do ângulo sólido com que cada uma vê a outra. Nesse método, portanto, a fonte sonora distribui toda sua energia para as superfícies da sala e estas, por sua vez, irradiam para todas as outras, e assim sucessivamente. Modulando-se o espectro de potência da fonte segundo sua

direcionalidade, tem-se uma fonte virtual direcional. A parcela da energia sonora emitida por uma fonte pontual  $F$  e recebida por uma superfície varia proporcionalmente com seu ângulo sólido em relação à fonte, segundo a relação

$$E_S = E_F \frac{\Omega_{FS}}{4\pi} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma d} \quad (3)$$

onde  $\Omega_{FS}$  é o ângulo sólido da superfície  $S$  em relação ao ponto  $F$ .

O tempo médio de chegada da energia da fonte a cada superfície é  $\tau/2$ . Essa aproximação é, a princípio, um tanto grosseira mas se fundamenta na velocidade de propagação do som, considerando portanto desprezíveis eventuais diferenças nos tempos de chegada com respeito à média. Não nos esqueçamos que esse é um modelo estatístico de propagação sonora na sala. Uma vez que a energia da fonte é emitida, podemos representar a distribuição das energias recebidas nas  $n$

superfícies por uma matriz linha da forma  $\mathbf{E}_0 = (E_{0_1}, E_{0_2}, E_{0_3}, \dots, E_{0_n})$ , onde  $E_{0_i}$  é a energia recebida inicialmente na superfície  $i$ .

### 3.1. Modelagem das Reflexões e das Superfícies

O primeiro passo na modelagem de uma superfície no método de transição de energia é a sua subdivisão seqüencial em elementos. Um dos cuidados necessários durante esse processo de subdivisão é o de atingir um valor médio aproximado para as áreas desses pequenos elementos de modo a se obter o máximo possível de homogeneidade no retalhamento das superfícies. Todas as superfícies nesse método são consideradas como difusores perfeitos, ou seja,  $\delta=1$ , espalhando portanto a energia incidente por todas as direções do plano que contém a normal à superfície e o raio incidente.

A direcionalidade da energia refletida difusamente se baseia na lei dos cosenos de Lambert<sup>10</sup> conforme mostrado na Fig. 4. Essa direcionalidade depende somente do ângulo de elevação  $\beta$  em relação à superfície, podendo ser expressa pela relação simples:

$$S_\beta = 2 \operatorname{sen}\beta \quad (4)$$

Após o processo de retalhamento é preciso definir qual a influência energética de cada elemento de superfície em relação a cada um dos outros. Cada um desses elementos irá refletir a energia recebida para todos os outros elementos visíveis da sala, a partir de seu centro geométrico. A transição de energia de um elemento  $i$  qualquer para um outro elemento visível  $j$  é dada por

$$\Psi_{ij} = (1 - \alpha_i) \frac{\Omega_{ij}}{2\pi} S_\beta e^{-\gamma d_{ij}} \quad (5)$$

Montando os elementos  $\psi_{ij}$  em uma matriz quadrada  $n \times n$  tem-se uma *matriz de transição de energia*  $\Psi$ . Pode-se então encontrar a distribuição de energia nas superfícies após  $k$  transições através da equação matricial

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{E}_0 \Psi^k \quad (6)$$

A cada iteração entre as superfícies ocorre também a captação nos receptores das energias refletidas, sempre associadas a um tempo médio de chegada de  $\tau/2$ .

## 4. MÉTODO HÍBRIDO

O método híbrido descrito a seguir utiliza uma combinação dos métodos descritos anteriormente como uma abordagem para simular os três fenômenos mais importantes da propagação do som em salas, que são a absorção, a reflexão especular e a reflexão difusa. É notório que os métodos de traçado de raios e de transição de energia variam sua acurácia em direções

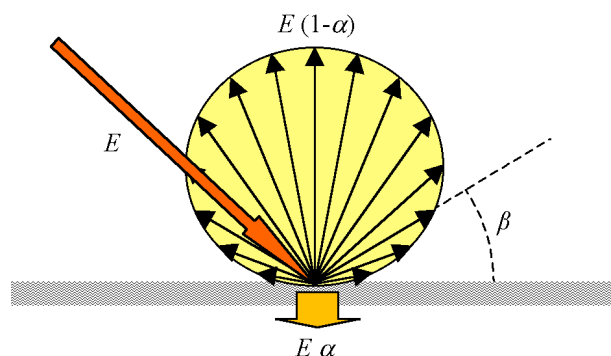


Figura 4: Reflexão difusa

opostas com a variação do coeficiente de espalhamento  $\delta$  das superfícies. Em outros termos, o método de traçado de raios funciona bastante bem para o cálculo das reflexões especulares, fornecendo resultados bastante precisos para as primeiras reflexões - tal como o método das imagens, porém a um custo computacional inferior. Contudo, mostra-se impreciso no cálculo da cauda reverberante da sala e em salas demasiadamente difusas. Por outro lado, o método das transições de energia modela razoavelmente bem salas muito difusas, sendo eficiente para o cálculo da cauda reverberante.<sup>4</sup> O método híbrido utilizado adotará, em essência, o traçado de raios para a simulação das reflexões especulares e o método de transição de energia para a simulação das reflexões difusas, com superposição dos resultados para o cálculo da resposta impulsiva.

#### 4.1. Processamento das Reflexões Especulares

O cálculo da resposta impulsiva neste novo método ocorre em duas etapas. Primeiramente processam-se as reflexões especulares, armazenando durante esse processamento as informações que serão usadas posteriormente no cálculo das reflexões difusas. Emitido por uma fonte virtual, um raio vai sendo submetido aos efeitos causados pelas superfícies de contorno enquanto simultaneamente é feita a identificação de sua reflexão em um elemento de superfície. Ao incidir em um desses elementos, o raio terá seu espectro de potência remodulado pelo espectro de absorção e agora também pelo espectro de espalhamento dessa superfície. A energia do raio após  $n$  reflexões é calculada pela seguinte expressão:

$$E = \frac{E_F}{NR} D_{\alpha\beta} e^{-\gamma t} \prod_{i=0}^n (1 - \alpha_i)(1 - \delta_i) \quad (7)$$

A Fig. 5 ilustra as parcelas da energia incidente que se distribuem em energia absorvida, energia refletida especularmente e energia refletida difusivamente (espalhamento).

A esse elemento, onde ocorreu a incidência, será acrescentada uma parcela da energia do raio associada a seu tempo de chegada, dada pela expressão

$$E_{i,t} = E_{i,t} + E(1 - \alpha_i)\delta_i \quad (8)$$

onde  $t$  é o tempo de chegada do raio no elemento. Armazenando, de forma discretizada, a energia em cada elemento ao longo do tempo obtemos a matriz retangular  $\mathbf{E}_D$ ,  $n \times T_{60}$ , onde  $n$  é o número total de elementos de superfície e  $T_{60}$  é o tempo de reverberação previamente estimado, em milissegundos, tem-se:

$$\mathbf{E}_D = \begin{pmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & E_{1,3} & \dots & E_{1,T_{60}} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & E_{2,3} & \dots & E_{2,T_{60}} \\ E_{3,1} & E_{3,2} & E_{3,3} & \dots & E_{3,T_{60}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ E_{n,1} & E_{n,2} & E_{n,3} & \dots & E_{n,T_{60}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

A cada reflexão do raio em um dos elementos a matriz  $\mathbf{E}_D$  é alterada na posição do elemento que foi atingido e do tempo de incidência. Dessa forma, encontramos ao final de todo o processamento do traçado de raios uma matriz  $\mathbf{E}_D$  inicial que representa a distribuição temporal e espacial da energia difusa que será refletida na segunda etapa da simulação. Nesse método, não se considera que a energia refletida difusamente venha a sofrer novas reflexões especulares. Dessa forma encontra-se, ao final da primeira etapa, apenas a resposta impulsiva especular  $h_e(t)$  da sala.

#### 4.2. Processamento das Reflexões Difusas

Na segunda etapa da simulação ocorre o processamento das reflexões difusas. A partir da matriz  $\mathbf{E}_D$  inicial calculam-se as transições de energia entre os elementos de superfície da sala. Inicia-

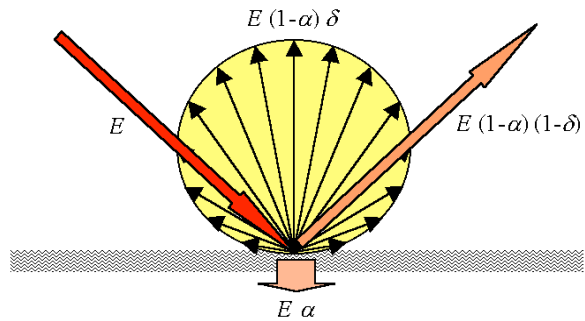


Figura 5: Efeito combinado de reflexão especular e difusa



se o processamento emitindo a energia de todos os  $n$  elementos de superfície da coluna  $t = 1$  a todos os outros elementos visíveis da sala, ou seja, aqueles para os quais o ângulo sólido é positivo, segundo a Eq. (5). Cada um dos elementos que recebe parte dessa energia refletida, a receberá em tempo distintos, ou seja em colunas distintas da matriz  $\mathbf{E}_D$ . Esses elementos, nos respectivos instantes, terão suas energias incrementadas.

A transição de energia difusa de um elemento  $i$ , refletida no instante  $t$ , para um outro elemento  $j$ , recebida no instante  $t+\tau$ , é expressa por

$$E_{j,t+\tau} = E_{j,t+\tau} + E_{i,t}\psi_{ij} \quad \text{onde } \tau = d_{ij}/c. \quad (10)$$

Percorrendo a matriz  $\mathbf{E}_D$ , de  $t = 1$  até  $t = T_{60}$ , e realizando a iteração dada pela Eq. (10), obtém-se a resposta impulsiva difusa da sala,  $h_d(t)$ . A resposta impulsiva  $h(t)$  virtual da sala será, então,

$$h(t) = h_e(t) + h_d(t) \quad (11)$$

## 5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

O código numérico que traduz o método híbrido foi elaborado em linguagem C++ e implementado em plataforma Windows, para microcomputador pessoal. A interface com o usuário é extremamente amigável, estando totalmente baseada em computação gráfica. A Fig. 6 mostra a tela principal do programa RAIOS 3.

São dados de entrada para o programa: as informações de cada fonte (espectro de potência por banda de oitava, direcionalidade, posição, orientação, número de raios emitidos,  $N_R$ , e outras secundárias); as informações de cada receptor (diâmetro, posição e outras secundárias); as informações da geometria da sala (tamanho, posição, orientação e material de cada plano, ao qual e são associados os coeficientes de absorção e espalhamento por banda de oitava nas seis bandas de 125 a 8000 Hz); as condições atmosféricas (temperatura, umidade e pressão barométrica); o critério de parada ou decaimento máximo,  $\Delta L$ , em dB; o número de elementos para a discretização espacial,  $N_E$ ; e a discretização desejada para a resposta impulsiva,  $\Delta t$ , em ms. Valores típicos para uma simulação com razoável nível de precisão em uma sala de geometria complexa são:  $N_R = 500k$ ,  $\Delta L = 60$  dB,  $N_E = 1k$  e  $\Delta t = 1$  m s.

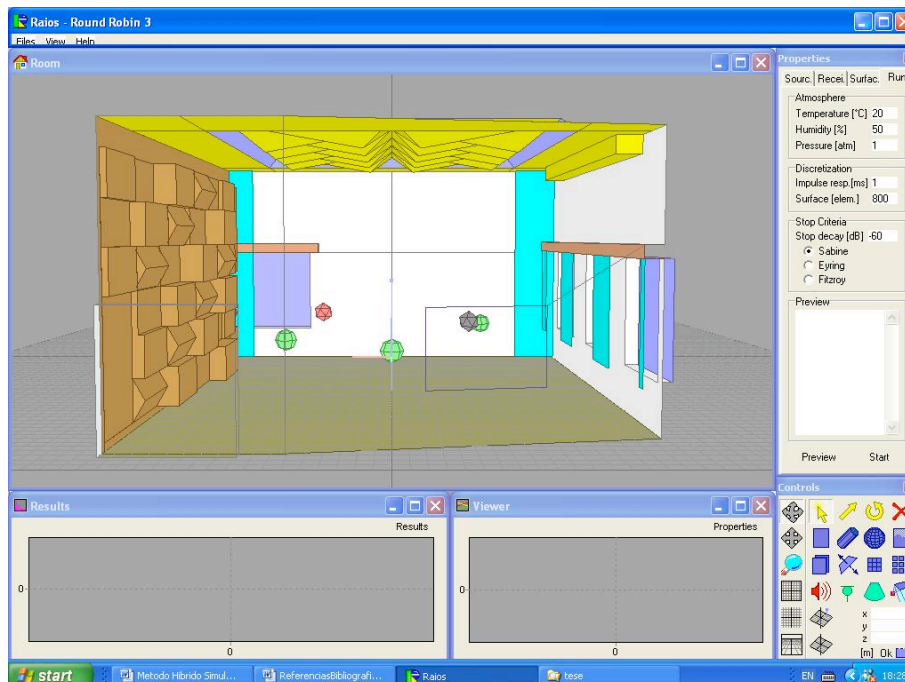


Figura 6: Tela principal do código computacional RAIOS 3

O programa apresenta cinco módulos de tela, como visto na Fig. 6, sendo a maior o módulo de edição da sala, a superior direita para a entrada dos dados, a inferior direita constitui um módulo de comandos, a inferior central consiste num módulo de visualização gráfica dos dados de entrada e o

módulo inferior esquerdo apresenta os resultados obtidos, segundo diversas janelas sequenciais. No módulo de entrada, é possível ainda calcular os tempos de reverberação segundo as fórmulas aproximadas de Sabine, Eyring e Fitzroy.

Essencialmente, o programa determina a resposta impulsiva quadrática (ecograma) da sala para o par fonte-microfone escolhido. A partir daí a curva de decaimento é obtida. Os parâmetros de qualidade acústica calculados pelo programa são:  $T_{30}$ , EDT,  $D_{50}$ ,  $C_{80}$ , TS, G, LF e LFC, para cada banda de frequência entre 125 Hz e 4 kHz, tal como definidos pela norma ISO 3382.<sup>17</sup> A definição,  $D_{50}$ , o fator de clareza,  $C_{80}$ , e o tempo central, TS, demandam a obtenção da resposta impulsiva da sala (RI). Para a determinação do tempo de reverberação,  $T_{30}$ , e do tempo de decaimento inicial, EDT, é necessário, além da resposta impulsiva, obter-se as curvas de decaimento. Finalmente, para se obter as frações de energia lateral, LF e LFC, é preciso ainda ponderar a energia sonora segundo sua direção de chegada.

## 6. RESULTADOS NUMÉRICOS

Apresentam-se a seguir alguns resultados obtidos pelo programa RAIOS 3, para uma sala de referência (estúdio de música), tal como a ilustrada na Fig. 6.

As Figs. 7 a 10 mostram os invólucros das respostas impulsivas, em pressão quadrática, da sala simulada obtida pelo método híbrido. A Fig. 7 ilustra a RI referente ao processamento das reflexões especulares, enquanto que a Fig. 8 mostra a RI referente ao processamento das reflexões difusas. Finalmente, superpondo ambas, obtemos a RI final da sala, apresentada na Fig. 9. Observe, na Fig. 10, que as curvas de decaimento por bandas de oitava obtidas a partir RI híbrida apresentam uma linearidade compatível com a difusividade da sala. A queda súbita que uma das curvas da Fig. 10 apresenta corresponde ao que efetivamente sucede ao levantarmos curvas de decaimento a partir de resultados experimentais em salas.

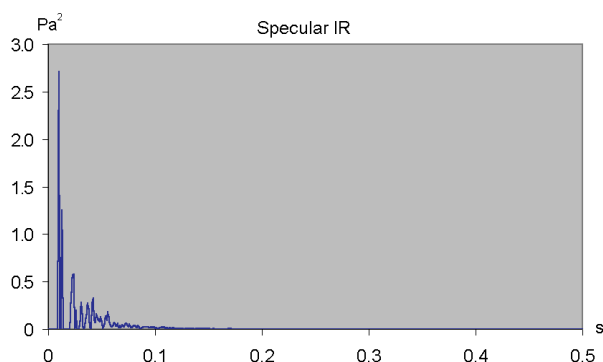


Figura 7: RI especular (parte inicial)

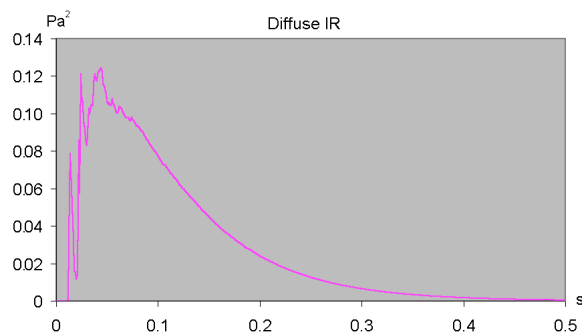


Figura 8: RI difusa (parte inicial)

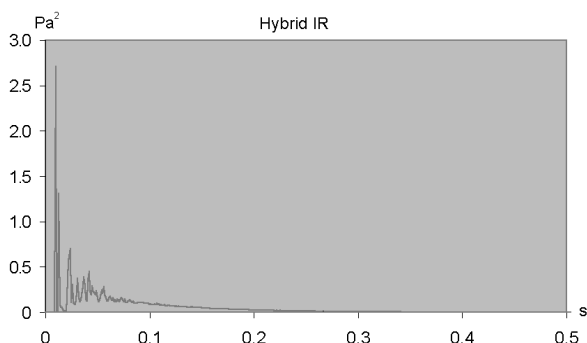


Figura 9: RI híbrida (parte inicial)

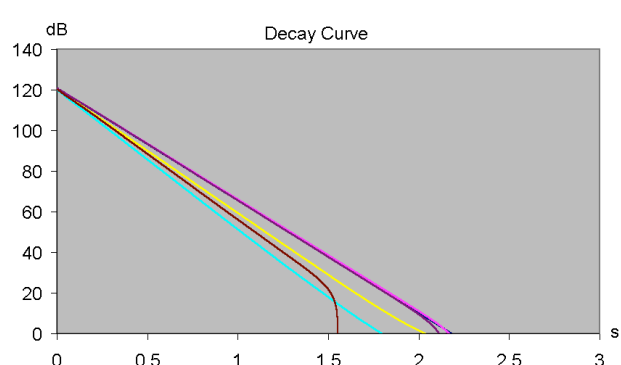


Figura 10: Curvas de decaimento

## 7. VALIDAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL

O uso do computador para predição da qualidade acústica de salas tem sido cada vez mais usual entre arquitetos e acústicos. Diversas técnicas numéricas para a modelagem da propagação do som, da fonte e dos receptores tem sido desenvolvidas e testadas com a finalidade de aproximar os resultados simulados dos experimentais. Para os desenvolvedores de *softwares*, entender as causas dessas diferenças é de fundamental interesse.

Essa foi a motivação do Departamento de Acústica do PTB (*Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*), Alemanha, realizar, em 1994, o primeiro projeto de intercomparação de simuladores numéricos, denominado *Round Robin* (RR1), o qual teve 16 participantes de 7 diferentes países. A sala utilizada como padrão de simulação foi um auditório localizado no próprio PTB, o qual deveria ter seus parâmetros  $T_{30}$ , EDT,  $D_{50}$ ,  $C_{80}$ , TS, G, LF e LFC calculados apenas para a banda de oitava de 1 kHz. Os resultados obtidos demonstraram discrepâncias tão grandes entre os diferentes participantes que, a princípio, uma predição computacional confiável para esses parâmetros parecia mesmo impossível. Entre 1996 e 1998 outra intercomparação de programas, o *Round Robin* 2 (RR2), com 16 participantes de 9 diferentes países, em um total de 13 diferentes programas, foi organizada pelo mesmo instituto. Dessa vez o ambiente examinado foi a sala de concertos ELMIA HALL, localizada em Jönköping, Suécia. Os resultados foram muito melhores dos que os encontrados no RR1, porém a complexidade da geometria da sala introduziu diversos outros problemas.

Por essa razão em 1999 decidiu-se iniciar uma nova versão desse evento, o *Round Robin* 3 (RR3), utilizando-se uma sala de geometria relativamente simples. A sala adotada foi um estúdio de música localizado no próprio PTB, a qual foi simulada em três fases de crescente complexidade. Finalizado em julho de 2002, o RR3 teve 21 participantes de 14 diferentes países, em um total de 10 diferentes programas. Ótimos resultados foram encontrados por alguns dos participantes, confirmando os programas de simulação numérica como uma ferramenta já confiável para o projeto acústico de salas.

O código computacional RAIOS 3 foi um dos programas participantes em todas as três fases do RR3, sendo o único representante da América Latina presente.

## 7.1. O Round Robin 3

Na primeira fase do RR3 o estúdio de música foi modelado em uma simples configuração. Suas paredes, teto e piso foram modelados em forma plana com coeficientes de absorção e espalhamento uniformes para todas as 6 bandas de frequência simuladas (de 125 Hz a 4 kHz). Duas posições de fontes e três posições de receptores, num total de seis combinações, foram fornecidas. A Fig. 11 mostra a geometria adotada nessa fase. Essa simplificação da geometria foi fornecida pelo próprio PTB, de modo que todos os programas rodaram sobre rigorosamente os mesmos dados

Na segunda fase os coeficientes reais de absorção foram adicionados, assim como um aumento no detalhamento da geometria, conforme mostrado na Fig. 12. Duas situações compuseram essa fase: sala com cortinas abertas e sala com cortinas fechadas, duplicando portanto o número da situações a serem simuladas.

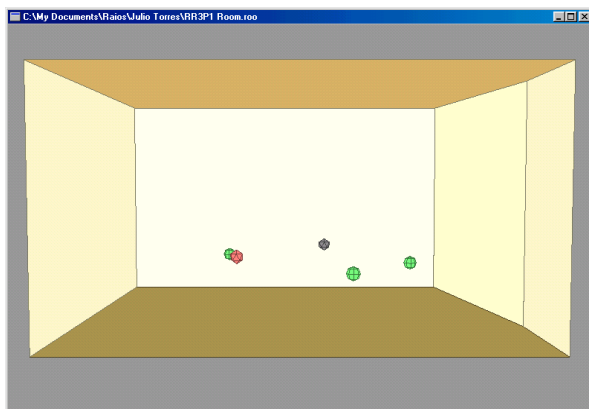


Figura 11: Sala da fase 1 do RR3

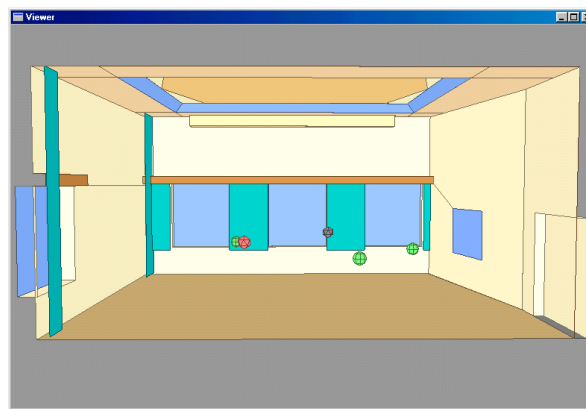


Figura 12: Sala da fase 2 do RR3

Finalmente, na fase 3, todos os detalhes do *design* da sala foram fornecidos, incluindo os perfis do teto e parede difusoras, conforme mostrado na Fig. 13. As duas fases anteriores serviram como uma preparação inicial para os participantes, sendo utilizadas como um objeto de estudo para o desenvolvimento de seus programas para a última fase. Os resultados da intercomparação, que serão avaliados e divulgados pelo coordenador do RR no periódico especializado *Acustica united with ActaAcustica*, em futuro próximo, serão os calculados nessa última fase. Nas fases 1 e 2 versões anteriores do programa (RAIOS 2 e RAIOS 2.2) foram utilizadas. Essas versões não computavam os efeitos da difusão. No entanto, na fase final e mais próxima da sala real, foi utilizado o RAIOS 3 com as implementações já descritas.

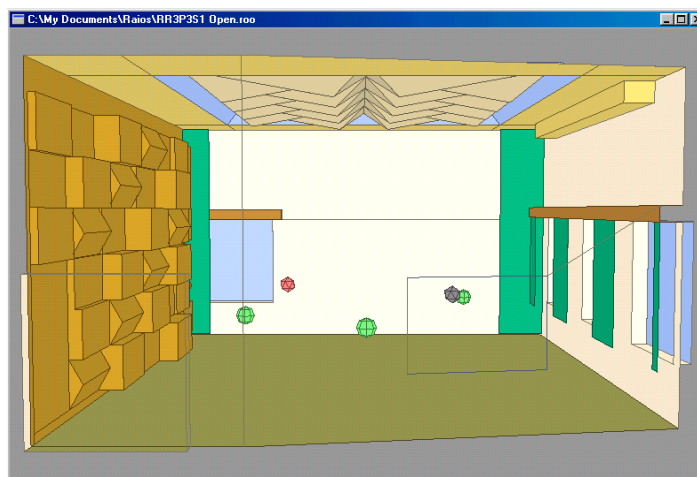


Figura 13: Sala da fase 3 do RR3

Cada um dos programas participantes recebeu um número de identificação, conhecido apenas pelos organizadores do evento e pelo próprio participante. O número 16 serviu de identificação para o RAIOS 3. Ao final de cada fase foi divulgado, utilizando-se essa identificação, os resultados de todos os participantes, de modo que cada um pudesse verificar como se portavam suas simulações face aos concorrentes.

Ao final da última fase foram também fornecidos os resultados das medições realizadas no estúdio de música do PTB. O RR3 serviu, portanto, como uma criteriosa validação experimental dos atuais programas de simulação numérica de acústica de salas.

## 7.2. Os resultados Obtidos pelo Programa RAIOS 3

Os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3, para todas as posições de fonte e receptor e em função da banda de frequência, estão resumidas nas Figs. 14 a 19. Os resultados completos estão disponíveis na página do PTB.<sup>20</sup> Nessas figuras vemos os resultados dos parâmetros  $T_{30}$ ,  $C_{80}$  e  $TS$ .

Os valores dos parâmetros encontrados pelo programa RAIOS 3 estão plotados em linha grossa branca de pontos circulares, e os resultados experimentais estão plotados em linha grossa preta de pontos quadrados com suas respectivas incertezas de medição. Os valores obtidos por todos os outros participantes estão plotados em linhas finas, com cores diversas. O tempo de processamento para a obtenção desses resultados em um microcomputador com processador Athlon de 1.2 GHz, foi de aproximadamente 1h30', exigindo aproximadamente 100 Mbytes de memória. (No atual estado da tecnologia disponível para computadores pessoais, esse tempo reduz-se a cerca de 20 minutos.)

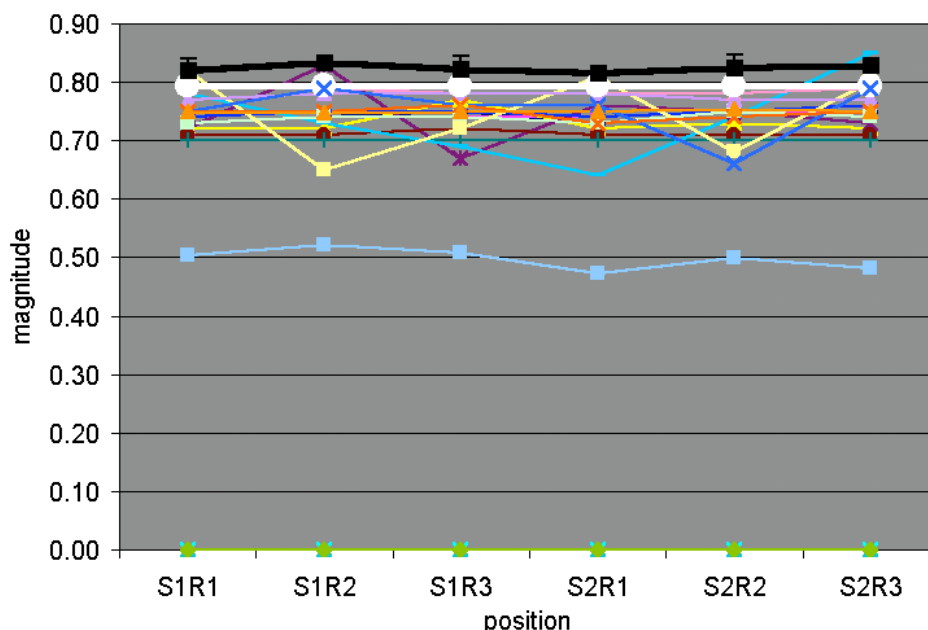


Figura 14:  $T_{30}$  em 2 kHz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas fechadas

A Fig. 14 mostra o tempo de reverberação da sala, traduzido pelo parâmetro  $T_{30}$ , nas seis combinações fonte-receptor, na banda de frequência de 2 kHz, sala com cortinas fechadas. Observe-se que o resultado que mais se aproxima da curva experimental é o do RAIOS 3. Note-se também que todas as curvas aproximam-se dos valores reais por baixo. Provavelmente isso se deve à dificuldade de se simular campos razoavelmente difusos, como o apresentado pela sala em estudo, e comprova o acerto do método híbrido adotado.

Os resultados comparativos de  $T_{30}$  para a fonte 1 e o receptor 3, em todas as bandas de oitava, para a sala com cortinas fechadas, estão grafados na Fig. 15. Agora observa-se que em baixa frequência (125 a 500 Hz) os resultados obtidos pelo programa aproximam-se por cima dos dados experimentais, enquanto em alta frequência ocorre o oposto. Mesmo assim, os valores estão bem próximos e os resultados obtidos pelo programa RAIOS 3 estão entre os melhores.

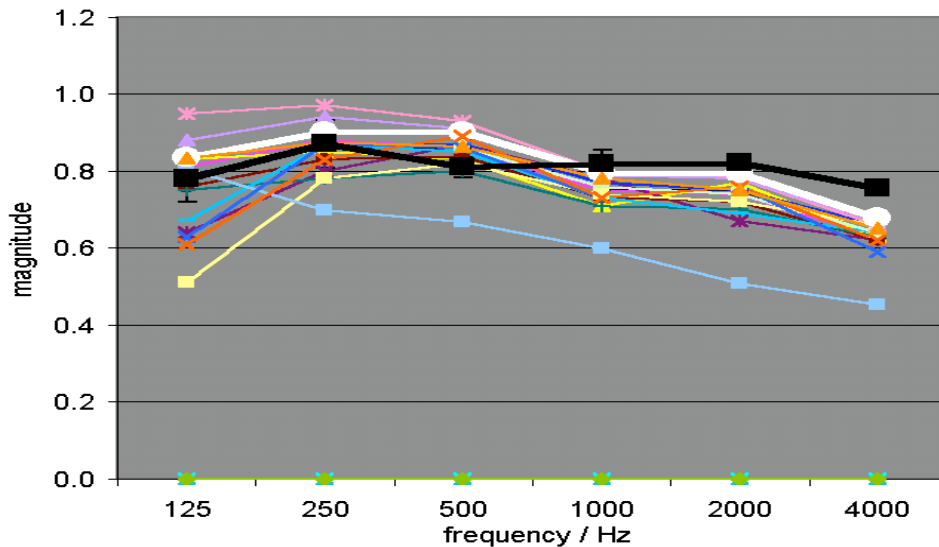


Figura 15:  $T_{30}$  para fonte 1 e receptor 3 em cada banda de frequência, cortinas fechadas

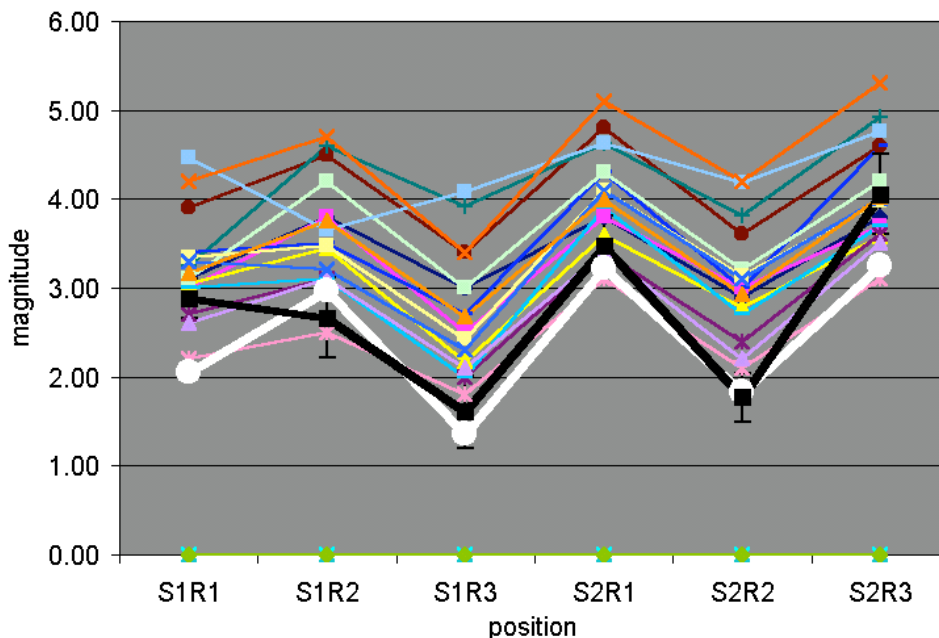


Figura 16:  $C_{80}$  em 250 Hz para cada combinação de fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

A Fig. 16 mostra os valores comparativos do fator de clareza da sala,  $C_{80}$ , para todas as combinações de fontes e receptores, na banda de 250 Hz, sala com cortinas abertas. Esse parâmetro é mais sensível às flutuações da resposta impulsiva da sala e, naturalmente, apresentou maiores discrepâncias entre os programas, para todos os pares fonte-receptor. Aqui, mais uma vez, os resultados do programa RAIOS 3 mostraram-se mais confiáveis do que a esmagadora maioria dos

programas concorrentes. O fator de clareza da sala é, portanto, bem avaliado pelo simulador computacional.

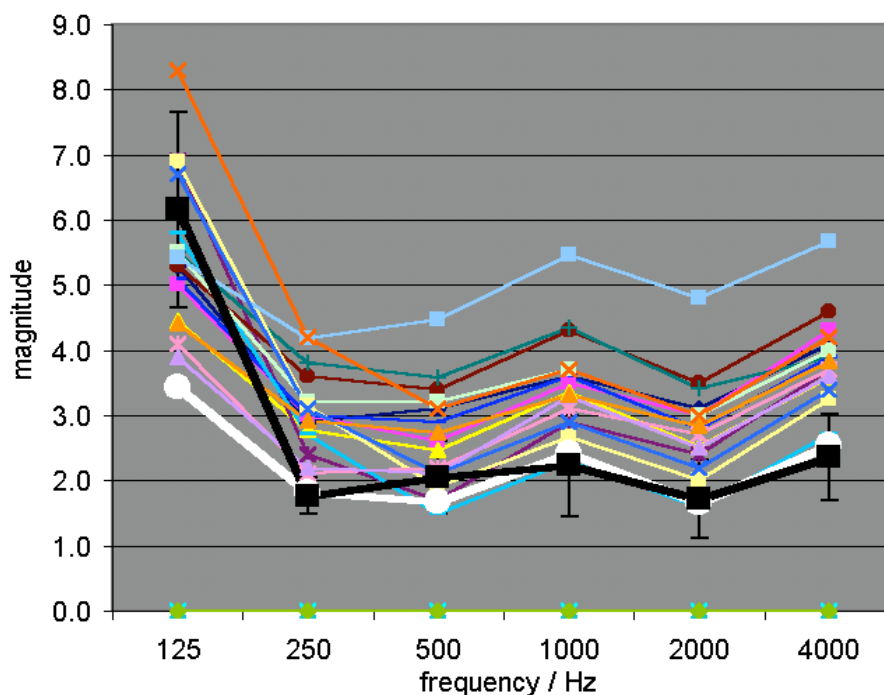


Figura 17:  $C_{80}$  para fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

A Fig. 17 apresenta a variação do mesmo fator de clareza,  $C_{80}$ , agora por banda de oitava, para a fonte 2 e receptor 2, sala com cortinas abertas. O caráter geral da figura é similar ao da anterior, ou seja, encontra-se uma discrepância muito grande de resultados entre os diversos programas participantes, situando-se o programa RAIOS 3 numa posição privilegiada com relação aos resultados experimentais, exceto na banda de 125 Hz. Cabe aqui um comentário. Nessa faixa de frequência, predomina o modelo modal de salas \_ que, presume-se, nenhum dos programas participantes utiliza. Portanto, nessa região, todos os programas erram e o código computacional RAIOS 3 não foi exceção.

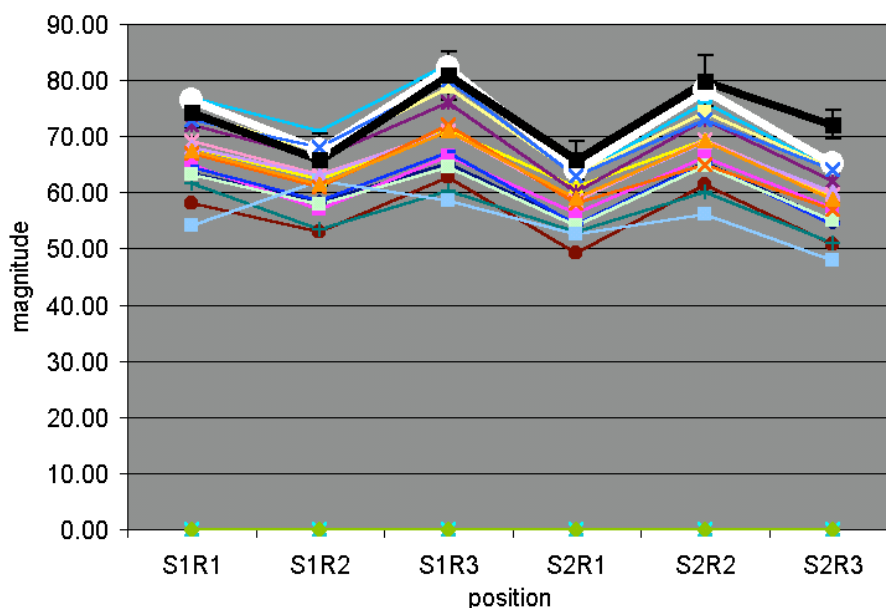


Figura 18: TS em 1 kHz para cada combinação entre fonte (S) e receptor (R), cortinas abertas

A variação espacial do parâmetro acústico denominado tempo central,  $TS$ , para a frequência de 1 kHz e sala com cortinas abertas é plotada na Fig. 18. Aqui observa-se também uma variância bastante grande; por exemplo, na posição S1R3, os resultados variam de 58 a 82 ms. Novamente, o

programa RAIOS 3 apresentou resultados bastante próximos dos experimentais para todas as posições de fonte e receptor.

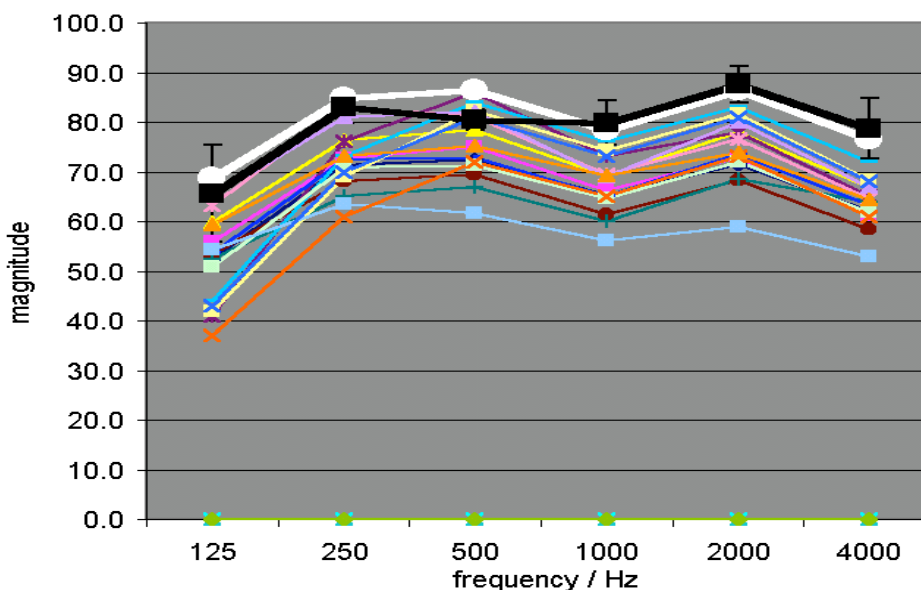


Figura 19: TS para a fonte 2 e receptor 2 em cada banda de frequência, cortinas abertas

Finalmente, os resultados de *TS* para a fonte 2 e microfone 2, nas seis bandas de oitava e sala com cortinas abertas é mostrado na Fig. 19. Mais uma vez o programa RAIOS 3 apresenta resultados altamente confiáveis na simulação, afastando-se um pouco somente na banda de 500 Hz.

Embora os resultados apresentados constituam apenas uma amostra das planilhas Exel encontráveis no *site* do PTB,<sup>20</sup> já se pode concluir que, efetivamente, os resultados de validação do programa foram excepcionais, mostrando o acerto do método híbrido escolhido, bem como a qualidade e eficiência de sua implementação computacional.

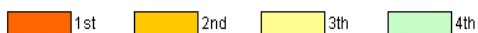
## 8. ERROS MÉDIOS RELATIVOS

Uma análise comparativa simples dos resultados dos programas participantes pode ser feita através do erro médio relativo. Para cada um dos participantes da 3ª fase - 17 ao todo; alguns programas não participaram dessa última fase - e para cada um dos nove parâmetros acústicos requeridos, foi computada a média dos erros médios, relativos às medições, para todas as seis combinações fonte-receptor e para todas as seis bandas de frequência. Isso nos fornece, mesmo que grosseiramente, um *ranking* que compara a precisão dos resultados de simulação dos programas participantes. Para o cálculo do parâmetro IACC apenas cinco participantes apresentaram resultados, sendo portanto excluído da estatística a seguir. Para esse cálculo, ainda, o participante de número 13 foi descartado por conta da inconsistência de seus resultados. A tabela 1 apresenta os erros médios relativos de cada participante para as configurações: cortinas abertas, cortinas fechadas e a média de ambas. As quatro primeiras colocações estão marcadas com as cores indicadas. As Figs. 20 e 21 nos mostram, em gráficos de barras, o resultado geral de cada participante.

Observando a Tabela 1 e as Figs. 20 e 21, conclui-se que, retirando-se do cômputo dos resultados o cálculo da correlação cruzada interaural, IACC, o programa RAIOS 3 apresentou o segundo melhor resultado global do *Round Robin 3* - corresponde à barra amarela, indicada pela seta -, credenciando-se como um simulador bastante confiável.

## RELATIVE MEAN ERROR (%)

For all source-receiver combinations and frequency bands



OPEN CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
T30		10.16	8.98	5.38	15.08	12.02	13.78	9.12	10.62	11.26	11.04	10.70	8.89	6.61	8.04	12.30	13.58	7.19
EDT		12.70	12.23	8.97	12.73	18.33	15.33	11.81	9.53	13.04	11.32	24.19	11.45	12.37	9.73	10.35	16.16	10.73
D		12.23	12.41	9.47	11.14	17.25	16.87	12.27	10.30	13.84	9.31	26.24	9.56	9.01	9.33	9.89	15.44	10.44
C		43.81	40.50	27.44	31.76	62.31	58.55	40.92	26.89	45.40	28.56	82.56	25.72	26.75	22.22	28.90	51.23	35.59
TS		15.36	14.36	9.15	13.95	21.14	19.82	15.00	12.41	16.54	12.64	22.14	9.76	8.63	7.29	12.03	19.23	12.53
G		4.24	4.10	3.84	6.61	4.62	5.74	3.96	8.42	4.24	6.81	3.26	4.16	3.90	3.93	6.97	4.57	3.80
LF		18.75	20.52	24.07	22.07		57.30	21.46	21.91	20.84	20.17	61.55	23.44	24.76	20.09	21.10	18.46	17.42
LFC		22.95	25.04	26.85			45.16	25.69		25.83		21.18	25.56	27.86	25.13			21.51
IACC		26.13	18.81				24.18		21.74		39.83	21.09						
MEAN T30-LF		16.75	16.16	12.62	16.19		26.77	16.36	14.30	17.88	14.26	32.95	13.28	13.15	11.52	14.50	19.81	13.96
MEAN T30-LFC		17.53	17.27	14.40			29.07	17.53		18.87		31.48	14.82	14.99	13.22			14.90

CLOSED CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
T30		8.82	8.59	9.06	13.52	10.47	11.14	8.11	14.24	8.69	14.01	27.08	9.58	8.50	6.61	11.02	13.82	7.54
EDT		13.68	14.48	14.96	12.51	14.92	14.08	12.85	12.24	13.22	11.86	26.98	16.72	16.64	12.53	11.73	11.56	13.16
D		9.02	8.70	8.98	10.51	9.50	10.16	8.27	13.99	8.96	11.06	12.95	9.08	8.47	12.74	11.19	9.15	7.92
C		19.24	18.17	20.70	19.87	22.57	22.48	17.63	21.45	18.99	19.28	43.82	17.47	17.12	22.00	19.67	19.29	16.53
TS		12.21	11.86	12.95	15.39	14.58	13.35	11.46	14.00	12.27	13.71	21.61	12.95	11.97	18.18	13.60	13.77	10.84
G		4.49	4.48	4.50	5.42	4.57	4.20	4.50	6.62	4.64	5.58	5.61	5.09	5.81	4.82	5.82	4.87	4.66
LF		23.74	25.69	30.03	26.15		69.53	32.51	21.22	26.67	21.50	76.21	28.48	28.74	25.17	22.68	26.39	23.45
LFC		31.04	32.67	35.67			54.68	37.74		33.77		29.44	31.90	34.13	32.89			33.40
IACC		19.84	12.88				18.93		15.48		39.24	22.39						
MEAN T30-LF		13.03	13.14	14.45	14.77		20.70	13.62	14.82	13.35	13.86	30.61	14.20	13.89	14.58	13.67	14.12	12.02
MEAN T30-LFC		15.28	15.58	17.10			24.95	16.63		15.90		30.46	16.41	16.42	16.87			14.69

OPEN AND CLOSED CURTAINS		1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	20	21
PARTICIPANT																		
MEAN T30-LF		14.89	14.65	13.53	15.48		23.74	14.99	14.56	15.61	14.06		13.74	13.52	13.05	14.09	16.96	12.99
MEAN T30-LFC		16.40	16.42	15.75			27.01	17.08		17.39			15.61	15.70	15.04			14.79

Tabela 1: Erros médios relativos para todas as combinações fonte-receptor e bandas de frequência

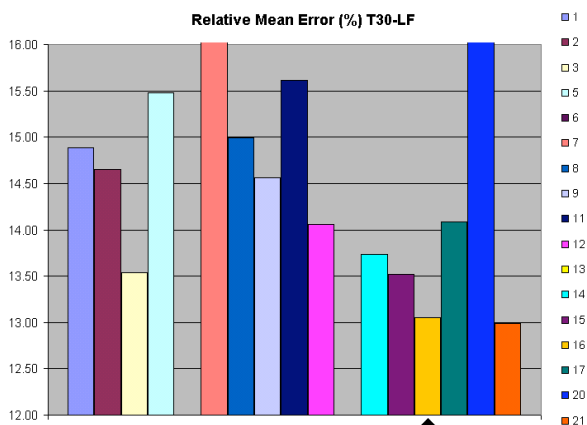


Figura 20: Erro médio relativo do parâmetro T<sub>30</sub> ao LF

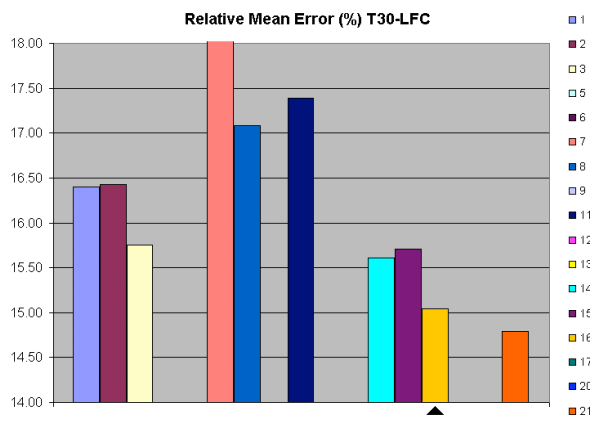


Figura 21: Erro médio relativo do parâmetro T<sub>30</sub> ao LFC.

## 9. CONCLUSÕES

A principal desvantagem do método de traçado de raios é a necessidade de um grande número de raios para se calcular corretamente a parte intermediária e final da resposta impulsiva de uma sala. Ao contrário, o método de transição de energia, utilizando-se de um tratamento estatístico para a propagação do som no ambiente, demonstra grande simplificação nos cálculos e a diminuição da exigência de capacidade de processamento para uma simulação mais correta da cauda reverberante. A combinação desses dois métodos numéricos demonstrou apresentar excelentes resultados, o que pôde ser verificado na validação do RR. As curvas de decaimento calculadas também apresentam grande linearidade, o que ocorre nas curvas reais medidas em salas difusas. Em especial, a linearidade encontrada ao final da curva de decaimento confirma uma simulação precisa do campo sonoro mesmo para a parte final da RI.

Devido a atual limitação dos processadores, diversas técnicas têm sido propostas para simular o efeito das reflexões difusas, muitas delas considerando apenas a tendência à aleatoriedade dessas reflexões. O algoritmo de difusão apresentado se baseia na atual formulação teórica do fenômeno, e mostrou ser suficiente para simular a difusividade de uma sala. A fusão desse algoritmo com o



método de traçado de raios, formando o algoritmo híbrido utilizado no programa RAIOS 3, mostrou bastante confiabilidade posicionando-o como o segundo melhor programa entre os participantes do RR3, segundo a estatística apresentada acima.

O programa possui ainda uma poderosa saída gráfica que simplifica a edição, modificação e visualização da sala. Rodando em ambiente *Windows*, o programa RAIOS 3 se apresenta extremamente amigável e todos seus recursos podem ser vistos e acionados em uma área reduzida. Atualmente o programa importa arquivos DXF (*Drawing eXchange Files*), padrão internacional para troca de arquivos gráficos entre programas (AutoCad, entre outros), de modo a facilitar sua utilização e propiciar maior interação com arquitetos, acústicos e outros profissionais. O tempo de cálculo também foi substancialmente reduzido por meio da implantação de alguns algoritmos otimizados.

O ponto crucial no método híbrido adotado é justamente o seu ponto de corte, que depende muito fortemente dos coeficientes de espalhamento das superfícies da sala. Na prática, sabemos que tabelas de coeficientes de espalhamento de materiais ainda não estão tão disponíveis como, por exemplo, tabelas de coeficientes de absorção - embora estas também não sejam muito confiáveis devido a erros na norma para sua medição [21,22]. Resulta que se os dados de entrada são imprecisos ou mesmo inexistentes, mesmo um excelente simulador não fornecerá resultados confiáveis.

## 10. DESENVOLVIMENTOS RECENTES

Algumas linhas de pesquisa dão prosseguimento à pesquisa na área de simulação numérica. A mais importante delas diz respeito ao processamento binaural no receptor. Em outros termos, a chegada dos raios sonoros no receptor leva em conta não só sua energia e retardo - suficientes para a determinação da resposta impulsiva - mas também sua direção, necessária à determinação da resposta impulsiva binaural. Com essa informação, dois aspectos podem ser abordados: a determinação da família de *correlações cruzadas interaurais*, IACC, IACC<sub>E</sub> (E de *Early*, precoce), IACC<sub>L</sub> (L de *Late*, tardio) etc. e a *auralização* da sala.

A auralização, que consiste em simular o campo sonoro percebido por um receptor humano no interior da sala - também conhecida como realidade virtual acústica - é um tema fascinante, que tem suscitado diversas publicações.<sup>23,24,25</sup> O ponto crucial de qualquer processo de auralização é poder realizá-la em tempos de cálculo não astronômicos. Para tal, é necessário um modelo ao mesmo tempo simples e fidedigno para as funções de transferência associadas à cabeça (HRTF's - *Head Related Transfer Functions*).

Após desenvolver modelos eficientes para as HRTF's baseados na transformada Wavelet e na aplicação de filtros esparsos,<sup>26</sup> estamos atualmente em uma fase de associar o módulo de auralização - que, naturalmente, utiliza como dados de entrada os resultados da simulação - de modo a integrá-lo à nova versão do programa, RAIOS 4.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kulowski, A., Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique, *Appl. Acoust.*, 18, 1984.
- [2] Dance, S. M., Shield, B. M., The Complete Image-Source Method for the Prediction of Sound Distribution in Non-diffuse Enclosed Spaces, *J. Sound Vibr.*, 201, 1997.
- [3] Farina, A., RAMSETE-A New Pyramid Tracer for Medium and Large Scale Acoustic Problems, *Proc. of Euro-Noise, France, 1995*.
- [4] Kruzins, E., Fricke, F., The Prediction of Sound Fields in Non-diffuse Spaces by a 'Random Walk' Approach, *J. Sound Vibr.*, 81, 1982.
- [5] Lewer, T., A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics, *Appl. Acoust.*, 38(2-4), 1993.
- [6] Vorländer, M., Simulation of the Transient and Steady-state Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-tracing/Image-source Algorithm, *J. Acoust. Soc. Am.*, 86(1), 1989.
- [7] D'Antonio, P., Trevor, J. C., Diffusor Application in Rooms, *Appl. Acoust.*, 60, 2000.
- [8] Bermond, R., Davies, W., Influence of Diffuse Reflections on the Playing of Musicians, *Proc. of 17<sup>th</sup> ICA, Roma, 2001*.
- [9] Torres, R., Kleiner, M., Svensson, U., Natsiopoulos, G., Subjective Evaluations of Scattering in Rooms, *Proc. of 17<sup>th</sup> ICA, Roma, 2001*.
- [10] Vorländer, M., Mommertz, E., Definition and Measurement of Random-incidence Scattering Coefficients, *Applied Acoustics*, 60, 2000.
- [11] ISO/WD 17487, Acoustics-Measurement of the Random-incidence Scattering Coefficient of Surfaces, *Intern. Organiz. Stand.*, 2001.
- [12] Lam, Y. W., A comparison of three diffuse reflexion modelling methods used in room acoustics computer models, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, pp. 2181 - 2192, 1996

- [13] Hargreaves, T. J., Cox, T. J., Lam, Y. W., D'Antonio, P., Surface Diffusion Coefficients for Room Acoustics: Free-field Measures, *J. Acoust. Soc. Am.*, 108(4), 2000.
- [14] Kleiner, M., Gustafsson, H., Backman, J., Measurement of Directional Scattering Coefficients Using Near-field Acoustic Holography and Spatial Transformation of Sound Fields, *J. Audio Eng. Soc.*, 45, 1997.
- [15] Farina, A., A New Method for Measuring the Scattering Coefficient and the Diffusion Coefficient Panels, *Acust.-acta acust.*, 86, 2000.
- [16] Mommertz, E., Determination of Scattering Coefficients from the Reflection Directivity of Architectural Surfaces, *Appl. Acoust.*, 60, 2000.
- [17] ISO 3382, Acoustics-Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Others Acoustical Parameters, Intern. Organiz. Stand., 1997.
- [18] ISO/WD 17487, Acoustics-Measurement of the Random-incidence Scattering Coefficient of Surfaces, Intern. Organiz. Stand., 2001.
- [19] AES-4id-2001, AES Information Document for Room Acoustics and Sound Reinforcement Systems – Characterization and Measurement of Surface Scattering Uniformity, *Audio Eng. Soc.*, 2001.
- [20] PTB home-page, [http://www.ptb.de/de/org/1/14/1401/\\_index.htm](http://www.ptb.de/de/org/1/14/1401/_index.htm), 2002.
- [21] Araújo, M.A.N., Investigações sobre os parâmetros intervenientes na medição de absorção sonora em câmara reverberante, Tese D.Sc, COPPE, UFRJ, 2002.
- [22] Nabuco, M. Tenenbaum, R.A., Schmitz, A., Experimental investigation about possible sources of uncertainty for sound absorption measurements in reverberation chambers, *Proceedings of ICA 2001, Roma, Itália, CD, Vol 2, 2001.*
- [23] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., Room acoustics auralization: HRTF modeling using wavelet transforms, *Proceedings of X DINAME, CD, pp. 151\_157, Ubatuba, Sp, 2003.*
- [24] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., HRTF modeling for efficient Auralization, *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Eletronics, CD, 2003.*
- [25] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., Low-order modeling and grouping of HRTFs for auralization using wavelet transforms, *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Canadá, CD, Vol. IV, pp. 33\_36, 2004.*
- [26] Torres, J.C.B., Petraglia, M.R., Tenenbaum, R.A., An efficient wavelet based HRTF model for auralization, *Acustica united with Acta Acustica, Vol 90(1), pp 108-120, 2004.*

# INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA DIRECIONALIDADE SONORA DE UMA HARPA DE CONCERTO

Arruda, J.R.F.\*; Gautier, F.\*\*; Renger, M.\*\*; Le Carrou, J.L.\*\*;  
Gilbert, J.\*\*

\*Laboratório de Vibroacústica (LVA), Unicamp, Campinas, Brasil

\*\*Laboratoire d'Acoustique (LAUM), Université du Maine, Le Mans, França

e-mail: arruda@fem.unicamp.br

Resumo: A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade. A direcionalidade é um dos atributos do som produzido por instrumentos musicais que influenciam na percepção sonora do ouvinte. A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz uma sensação de espacialização do som, que tem sido investigada com interesse crescente por pesquisadores da área de acústica musical e eletroacústica. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante não só garantir a fidelidade em termos de resposta em frequência, mas também conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura. Neste trabalho, a direcionalidade de uma harpa de concerto é investigada. As medidas frequenciais em regime estacionário foram feitas usando uma grade de medidas com 400 pontos distribuídos sobre uma superfície hemisférica erguida sobre um pequeno trecho cilíndrico em uma câmara semi-aneóica. Três pontos da tábua harmônica foram excitados com um excitador eletrodinâmico acionado por um sinal aleatório do tipo ruído branco, sendo um ponto de excitação para cada faixa de frequências analisada. Os resultados mostram que, em baixas frequências, a direcionalidade da harpa tem padrões simples e pode ser reproduzida com dois monopólos acústicos situados nas posições da tábua harmônica e da abertura traseira. Modelos mais complexos, constituídos de múltiplas fontes sonoras do tipo monopólo, foram ajustadas aos dados medidos para reproduzir os padrões de direcionalidade em frequências mais altas. A possibilidade de reprodução dos sons produzidos por uma harpa com uma matriz de alto-falantes mantendo suas características de direcionalidade é discutida.

## 1. INTRODUÇÃO

A distribuição direcional da intensidade sonora emitida por uma fonte é caracterizada pela direcionalidade (ou diretividade) [1]. Para defini-la, formulamos a potência sonora numa superfície esférica de raio  $r$ :

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} \int_{4\pi} P^2(r, \theta, \phi) r^2 d\Omega \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade do som,  $\rho$  a densidade de massa e  $P$  a pressão sonora.

Separando as variáveis, tem-se:

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} r^2 P_r^2(r) \int_{4\pi} H^2(\theta, \phi) d\Omega \quad (2)$$

Na expressão acima, a direcionalidade é expressa por  $H(\theta, \phi)$ . O Fator de Direcionalidade é usualmente definido como:

$$D = \frac{I_{\text{direcional}}}{I_{\text{esférica}}} = \frac{P_r^2(r)}{P_e^2(r)} \quad (3)$$

onde

$$\Pi = \frac{1}{2\rho c} 4\pi r^2 P_e^2 \quad (4)$$

Neste trabalho, utilizaremos a função  $H(\theta, \phi)$  para caracterizar a direcionalidade.

A direcionalidade é uma característica da fonte sonora. Os livros-texto de acústica geralmente tratam do problema da direcionalidade de fontes sonoras em geral e de alto-falantes em particular. A Figura 1 mostra a direcionalidade de um pistão rígido de raio  $a$  para  $ka=10$ , sendo  $k$  o número de onda ( $k = \omega/c$ ), onde a função, que é axisimétrica e não depende do ângulo  $\phi$ , é expressa por [1]:

$$H(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (5)$$

A combinação da direcionalidade da fonte sonora com a acústica da sala produz a sensação de espacialização do som. Para reforçar a potência sonora de um instrumento musical em uma sala com meios eletroacústicos ou para fazer sua reprodução sonora com meios eletroacústicos, é importante, portanto, conhecer seus padrões de direcionalidade. Os padrões de direcionalidade diversos instrumentos têm sido caracterizados e reportados na literatura [2]. Uma monografia recente [3] estuda a questão da direcionalidade dos instrumentos musicais tendo em vista a performance musical eletroacústica em salas de concerto e a captação de som em estúdios de gravação. Além de tratar da direcionalidade dos instrumentos, essa monografia aborda questões relativas à acústica de salas. Outros trabalhos recentes abordam a questão da direcionalidade de instrumentos musicais, demonstrando a atualidade do tema [4,5,6].

Pelo fato da direcionalidade de uma caixa de som ser muito diferente da direcionalidade de um instrumento musical, a percepção do som reproduzido eletroacusticamente é prejudicada. Curtin [7] relata que Pierre Boulez costumava dizer que a caixa de som torna 'anônima' uma gravação de um instrumento musical. Num artigo recente, Curtin [7] entrevista o Professor Weinreich da Universidade de Michigan, que introduziu o conceito de '*Directional Tone Color*', ou 'Colorido Direcional da Tonalidade'. Estes trabalhos publicados em veículos científicos e artísticos mostram que a direcionalidade é importante na percepção do som musical.

Cabe notar, ainda, que as sensações subjetivas da percepção sonora, estudadas dentro da especialidade chamada de Psicoacústica [8], têm características freqüenciais e temporais. Fenômenos como o mascaramento comprovam isto. Portanto, no estudo da direcionalidade, pode ser relevante estudar não apenas o comportamento em regime estacionário, como é usual, mas também o seu comportamento temporal. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será comentada neste caso.

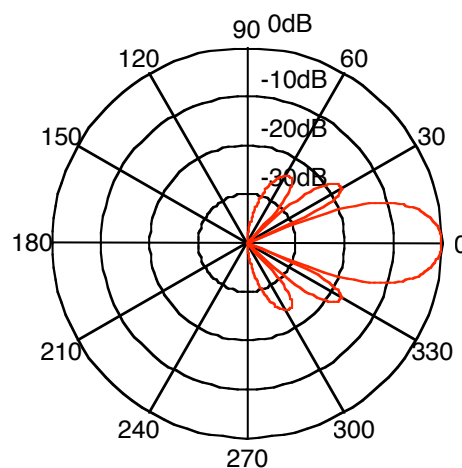


Figura 1: Direcionalidade de um pistão rígido no ar ( $ka=10$ ).

## 2. DIRECIONALIDADE DA HARPA EM REGIME ESTACIONÁRIO

A harpa investigada é uma harpa de concerto Camac Atlantide Prestige (Figura 2). Três faixas de freqüência foram escolhidas: 100 Hz-1 kHz, 50-5 kHz e 5-15 kHz. Para cada uma delas, um ponto de excitação diferente foi escolhido e um excitador eletrodinâmico ('shaker') foi conectado através de uma haste flexível à tábua harmônica próximo ao ponto de fixação das cordas, acessível através das aberturas do fundo da caixa acústica do instrumento. Para as freqüências mais baixas, a primeira abertura, junto à base do instrumento, foi usada (correspondendo às notas mais baixas). Para a faixa média foi usada a abertura central e para a faixa mais alta a menor abertura, à altura das notas mais altas. A figura 3 mostra um esquema da montagem experimental para a faixa média.

Para levantar as curvas de direcionalidade, foi utilizada uma 'antena' de microfones de instrumentação omnidirecionais de 1/4" (eletreto, ICP), normalmente utilizados em um sistema de holografia acústica. A configuração da antena, composta de 35 microfones, montada em uma estrutura de modo a formar um círculo alongado nas duas pontas, é mostrada na Figura 4.



Figura 2: O modelo de harpa estudado (Camac Atlantide Prestige)

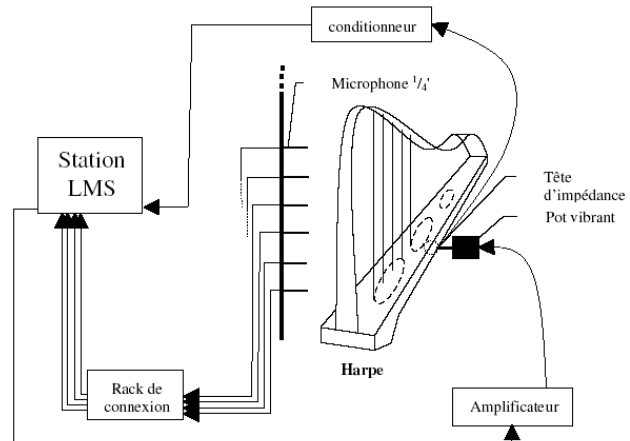


Figura 3: Esquema da montagem experimental.

A maioria dos estudos sobre a direcionalidade de instrumentos musicais preconiza uma distância entre a fonte e os microfones de 2m para que se possa considerar uma condição de campo distante [1]. Para uma frequência mínima de 150 Hz, uma distância mínima de 2,26m seria necessária para a condição de um comprimento de onda de distância da fonte, uma vez que a relação entre comprimento de onda e frequência é dada por [1]  $\lambda_{\max} = c/f_{\min}$ , onde  $\lambda_{\max}$  é o maior comprimento de onda na faixa e  $f_{\min}$  é a frequência mínima. A distância dos microfones foi fixada em 2,35m do centro geométrico da harpa, que pode, no nosso caso, ser representada por um retângulo de 1,20m de altura e 0,7m de lado. As diagonais deste retângulo são as descritas pela tábua de harmonia quando esta gira sobre um eixo vertical.

O ensaio foi feito em uma câmara semi-aneecóica do Centre de Transfert de Technologie du Mans, em Le Mans, França. A harpa foi colocada sobre um dispositivo giratório e as medições foram feitas em ângulos espaçados de 10°. A Figura 5 mostra uma fotografia da montagem experimental em câmara anecóica. A Figura 6 mostra a malha de pontos de medida em torno da harpa no ensaio em regime estacionário.

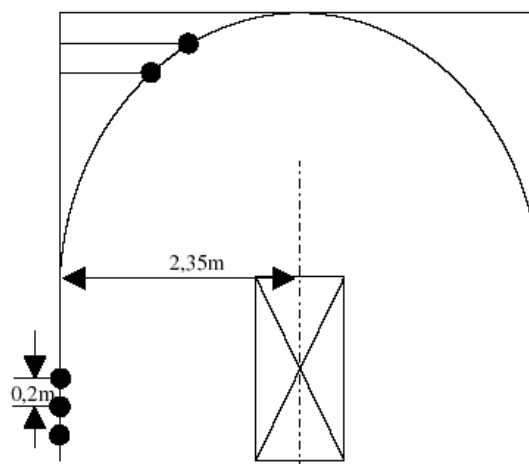


Figura 4: Configuração da “antena” de medição com 35 microfones.

Num primeiro ensaio, as medidas foram feitas em um hemisfério com  $360^\circ$  para verificação da simetria da fonte. Verificada a simetria, as demais medições foram simplificadas para  $180^\circ$  para diminuir o volume de dados medidos. A excitação foi feita com um sinal de excitação aleatório do tipo ruído branco. A medida de amplitude e fase foi feita para cada microfone usando como sinal de referência o sinal de força medido com uma cabeça de impedância. A amplitude e a fase da pressão em cada ponto foram obtidas multiplicando o espectro cruzado entre a pressão e o sinal de referência pela raiz quadrada do auto-espectro deste sinal. A aquisição foi simultânea em 36 canais.

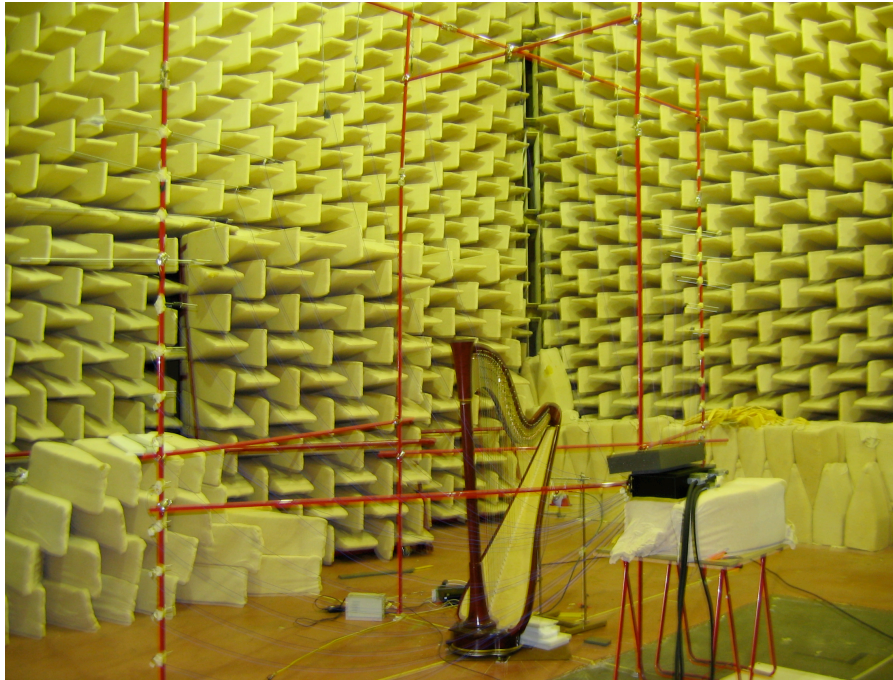


Figura 5: Fotografia da montagem experimental em câmara anecóica

Para cada frequência, tem-se um padrão de direcionalidade que pode ser visualizado traçando a distribuição da pressão em função do ângulo de rotação da harpa  $\theta$  e da altura  $z$  em relação ao solo (ângulo  $\phi$ ). Para ilustrar, as Figuras 7, 8 e 9 mostram a distribuição de pressões nas frequências de 148, 198 e 248 Hz.

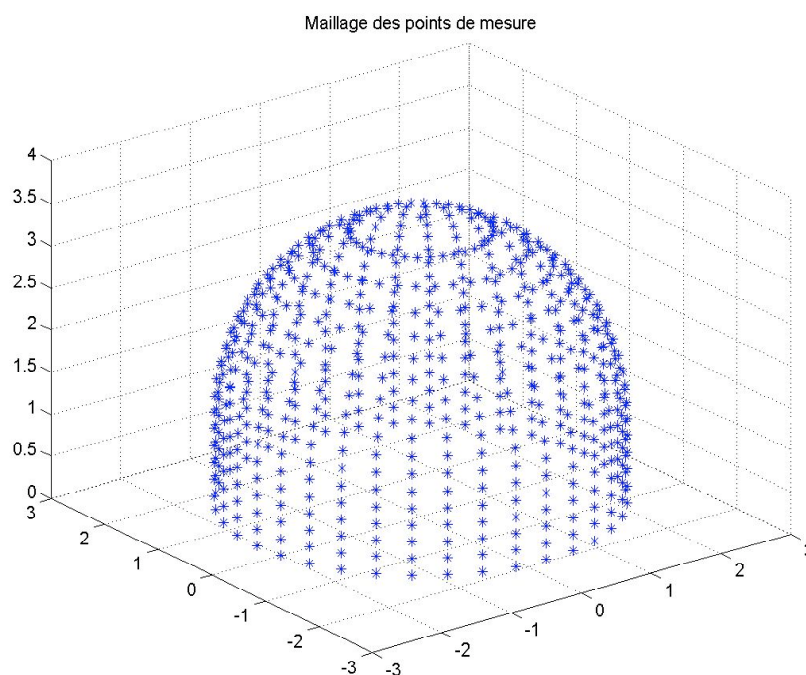


Figura 6: Malha de pontos de medida da pressão no ensaio em regime estacionário

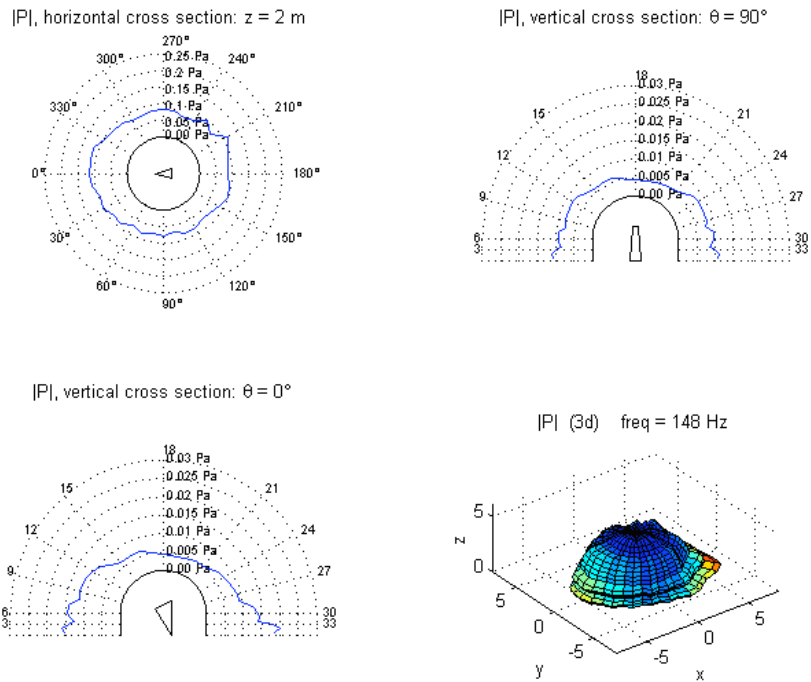


Figura 7: Representação gráfica da direcionalidade medida em 148 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

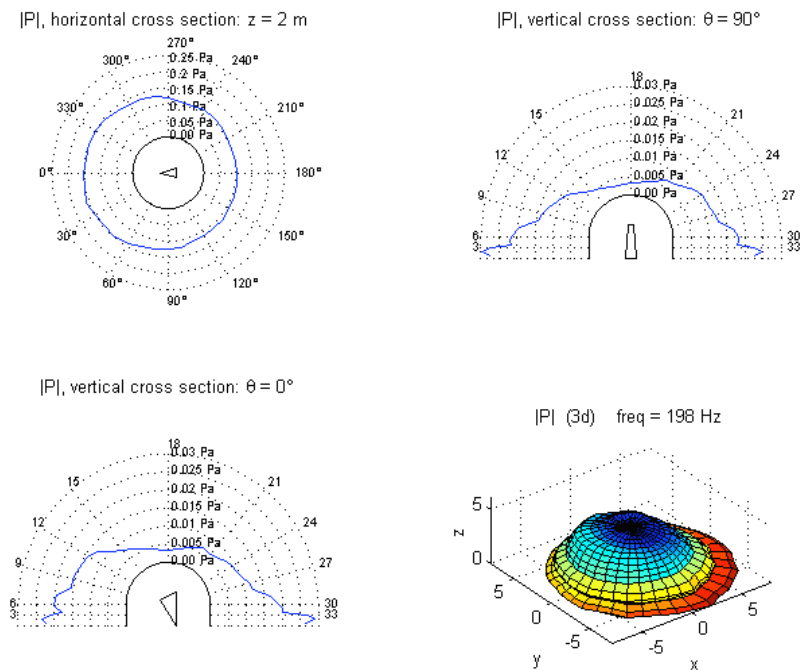


Figura 8: Representação gráfica da direcionalidade medida em 198 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

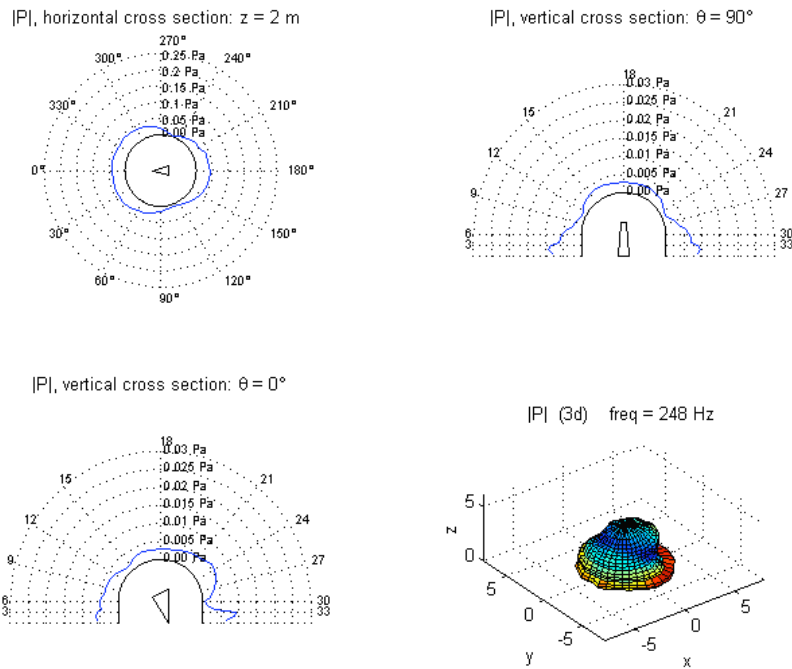


Figura 9: Representação gráfica da direcionalidade medida em 248 Hz: planta com altura de corte indicada, duas elevações com o meridiano do corte indicado e vista em 3D.

## 3. MODELAGEM POR FONTES SONORAS ELEMENTARES

Existem várias maneiras de se fazer a modelagem matemática de uma fonte sonora. No caso de instrumentos de corda, o mecanismo de geração do som inicia-se pela excitação mecânica das cordas que, então, vibram em suas frequências naturais, que formam uma série harmônica (na verdade aproximadamente harmônica, uma vez que as cordas reais não têm um comportamento ideal). As cordas são ligadas a uma estrutura flexível, com uma superfície importante, capaz de transformar de forma eficiente as vibrações em som radiado (tábua harmônica). Como, em frequências muito baixas, a eficiência da radiação de cascas flexíveis é reduzida (as dimensões da superfície teriam que ser demasiado grandes), os instrumentos possuem cavidades acústicas que possuem modos em baixas frequências responsáveis pela produção de som em notas mais graves. Estas caixas devem ter volume tanto maior quanto mais graves forem as notas que se desejam atingir. Os modelos mais fiéis às características físicas do problema são os modelos que representam a estrutura mecânica do instrumento, particularmente a tábua harmônica e a caixa acústica com suas aberturas. As vibrações desta estrutura imersa no fluido que é o ar geram o campo acústico em torno do instrumento. Ao estudo das vibrações de uma estrutura imersa num meio fluido e sua interação dá-se o nome de vibroacústica [9]. No caso de instrumentos musicais, como o fluido é o ar, pode-se, em uma primeira aproximação, considerar que o ar não altera substancialmente a resposta da estrutura mecânica, no caso em madeira, e o problema pode ser tratado de forma desacoplada: calculam-se as vibrações da estrutura e, num segundo passo, o campo sonoro gerado por estas vibrações das superfícies. Mesmo assim, a complexidade da geometria dos instrumentos musicais e a dificuldade em caracterizar os materiais (madeiras) de que são feitos, tornam o problema de difícil solução, mesmo utilizando poderosos “softwares” baseados em métodos numéricos como o método dos elementos finitos e o método dos elementos de contorno [10].

Uma outra abordagem, mais simples e mais antiga, para modelar fontes sonoras é o chamado método das fontes elementares. Este método vem sendo objeto de interesse renovado pela comunidade de acústica [11,12] por ser de fácil implementação computacional e beneficiar-se dos avanços verificados na álgebra linear computacional, tais como os métodos de regularização [13]. Neste método, a fonte física real, no nosso caso o instrumento musical, é substituída por um conjunto de fontes sonoras elementares, que podem ser monopólos, dipolos ou fontes de ordem mais elevada. O mais comum, e que será usado aqui, é utilizar monopólos.



O campo de pressão sonora criado por um monopólo em espaço semi-aneecóico pode ser obtido colocando-se uma fonte igual de forma simétrica à superfície rígida (Figura 10) e a pressão resultante para uma vazão da fonte  $Q$  pode ser expressa como:

$$p(r, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-jkr}}{|r|} \left( 1 + \frac{|r|}{|r'|} e^{-jk(r'-r)} \right) \right\} Q \quad (6)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ .

Um primeiro modelo muito simples para representação da harpa como fonte sonora em baixas frequências, baseado em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratoire d'Acoustique da Universidade do Maine (LAUM) consiste de apenas dois monopólos, um situado na tábua de harmonia e um situado na abertura na caixa acústica, ambos próximos à base do instrumento, onde as baixas frequências são excitadas. A Figura 11 mostra a posição das duas fontes. As coordenadas utilizadas no modelo foram  $y_t=0,26\text{m}$ ,  $z_t=0,45\text{m}$ ,  $y_h=0,41\text{m}$  e  $z_h=0,37\text{m}$ . As vazões destas duas fontes são denotadas por  $Q_t$  e  $Q_h$ , respectivamente. A pressão numa posição distante de  $r_t$  em relação a  $Q_t$  e de  $r_h$  em relação a  $Q_h$  é expressa como:

$$p(r_t, \omega) = \frac{j\omega\rho}{4\pi} \left\{ \frac{e^{-jkr_t}}{|r_t|} \left( 1 + \frac{|r_t|}{|r'_t|} e^{jk(r'_t-r_t)} \right) + \frac{e^{-jkr_h}}{|r_h|} \left( 1 + \frac{|r_h|}{|r'_h|} e^{jk(r'_h-r_h)} \right) \right\} \times \begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} \quad (7)$$

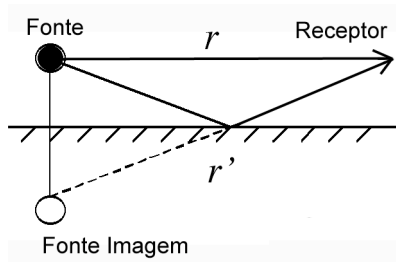


Figura 10: Configuração para representação de um monopólo em espaço semi-aneecóico.

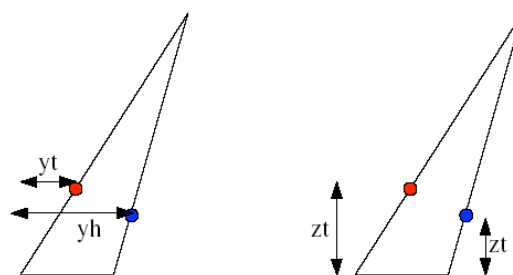


Figura 11: Posição dos dois monopólos no modelo simples da harpa

Dado um conjunto de pontos onde a pressão é medida, tem-se um igual número de equações como a equação (7). Estas equações constituem um sistema linear de equações, tendo como incógnitas as duas vazões, e podem ser organizadas de forma matricial. A solução deste sistema pode ser expressa da forma:

$$\begin{Bmatrix} Q_t \\ Q_h \end{Bmatrix} = \frac{4\pi}{j\omega\rho} [Geo]^+ \{p(r, \omega)\} \quad (8)$$

onde  $[ ]^+$  denota a inversa generalizada de uma matriz, que produz, neste caso, a solução de mínimos quadrados. Assim, são obtidas as vazões dos monopólos que caracterizam a harpa em baixas frequências. A Figura 12 compara a distribuição das pressões numa elevação de  $z=0,6\text{m}$  calculada com o modelo de duas fontes e a distribuição obtida experimentalmente. Observou-se que as vazões das duas fontes são de magnitude aproximadamente igual e fase oposta (Figura 13). Isto veio confirmar a interpretação física do fenômeno em baixas frequências proposta no LAUM em estudos anteriores, mostrada na Figura 14.

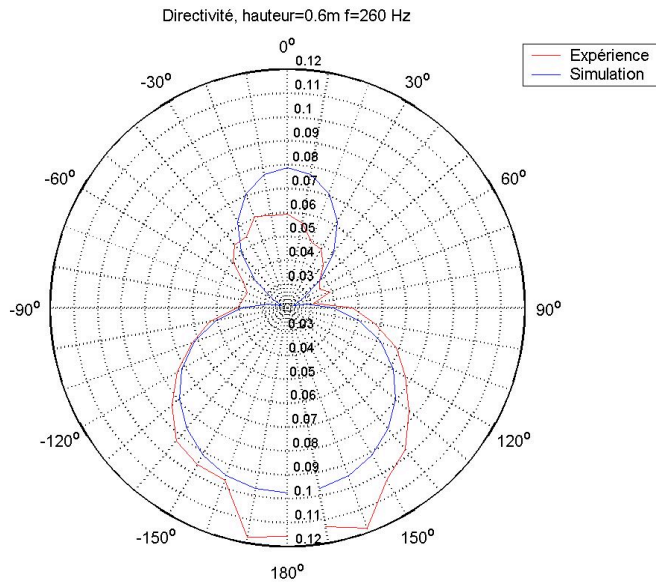


Figura 12: Direcionalidade medida da harpa e direcionalidade do modelo de duas fontes elementares em 260 Hz.

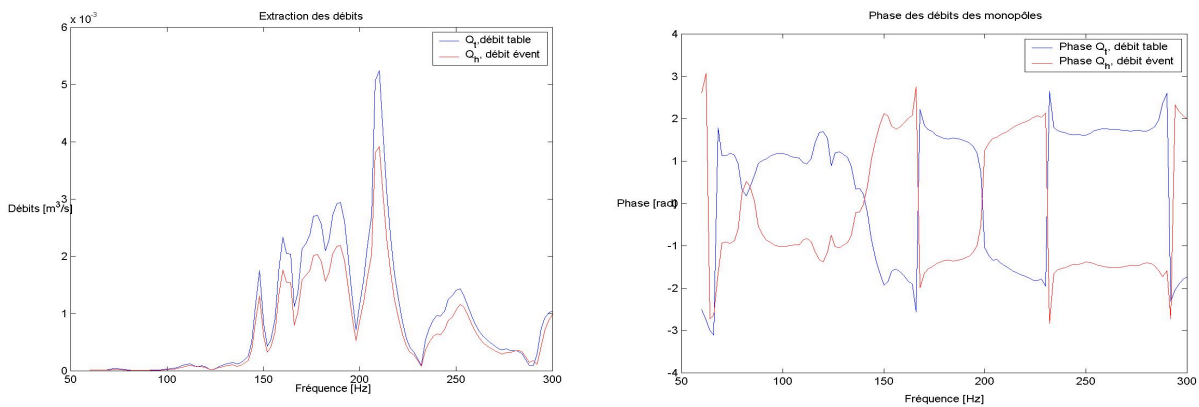


Figura 13: Magnitude e fase das vazões  $Q_t$  e  $Q_h$ .

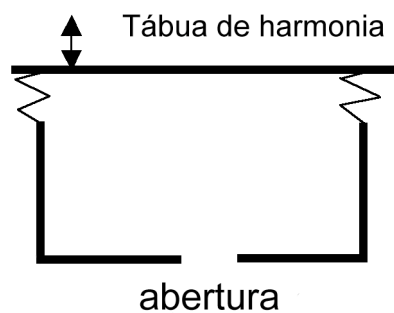


Figura 14: Modelo físico da harpa em baixas frequências proposto no LAUM.

Para frequências de até cerca de 300 Hz o modelo de dois monopólos representa razoavelmente bem o padrão de direcionalidade da harpa. Para frequências superiores são necessários mais monopólos. A Figura 15 mostra a direcionalidade do modelo de dois monopólos comparada à direcionalidade medida na harpa em 352 Hz, deixando evidente que o modelo não consegue representar a direcionalidade de 4 lóbulos da harpa.

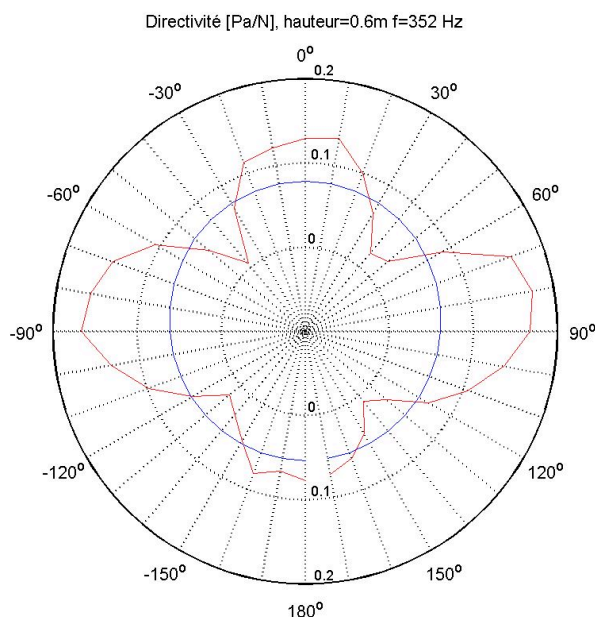


Figura 15: Direcionalidade medida da harpa e direcionalidade do modelo de duas fontes elementares em 352 Hz.

## 4. DIRECIONALIDADE TEMPORAL DA HARPA EM REGIME TRANSITÓRIO

Como comentado antes, o comportamento temporal da direcionalidade de um instrumento musical também é relevante para a percepção sonora. Neste trabalho foi feita uma primeira medição da direcionalidade temporal da harpa, mas os resultados da análise ainda não estão disponíveis. Apenas a metodologia usada nas medições será brevemente descrita aqui.

Como o estudo temporal exige que todos os sinais de pressão sejam registrados simultaneamente, o sistema de aquisição de sinais de 36 canais usado impôs uma limitação ao número de pressões medidas. Como um dos canais foi usado para registro de voz, decidiu-se fazer uma antena circular plana de 35 microfones com base na hipótese de que a direcionalidade horizontal é mais importante que a vertical no caso em estudo.

Foram registrados os sons produzidos por uma harpista, primeiramente com cada nota separadamente e, depois, com glissandi. Diversos registros temporais em diferentes faixas de frequência e com diferentes durações foram feitas. A harpa é dotada de 46 cordas, sendo as de número 45 a 34 cordas de aço, as de 33 a 7 de tripa e as de 6 a 0 de nylon. No primeiro registro, na faixa DC-2kHz, com 8 segundos de duração, todas as cordas foram sucessivamente excitadas, da Do45 à Sol00. Da corda 45 à corda 25, o ataque é feito da mão esquerda e, da 24 à 00, da mão direita. A corda 25 pode ser atacada indiferentemente da mão direita ou esquerda. Num segundo teste, para cada fixa de cordas, foi escolhida uma faixa de frequências mais apropriada e um tempo de duração adequado, de 1,6s, DC-10,2kHz, para a faixa de notas mais altas (Sol00 a Do24) a 5,12s, DC-3,2kHz, para as mais baixas (Sol41 a Do45). Os glissandi ascendentes, descendentes, em terças e super glissandi foram analisados na faixa DC-3,2kHz com 5,12 segundos de gravação. Além destes, foram gravados ainda os chamados 'sons harmônicos', obtidos pela harpista bloqueando alguns modos das cordas opondo-lhes a palma da mão durante o ataque. Os sons xilofônicos são obtidos abafando a base da corda com um dedo durante o ataque. Os sons ditos 'de violão' são provocados pelo ataque da corda em sua base.

A Figura 16 mostra um esquema do aparato experimental e a Figura 17 uma fotografia tirada durante as gravações.

O conjunto de sinais digitalizados está organizado em um CD-ROM aguardando a análise de direcionalidade temporal, que será feita na seqüência do projeto e reportada em futuros trabalhos.

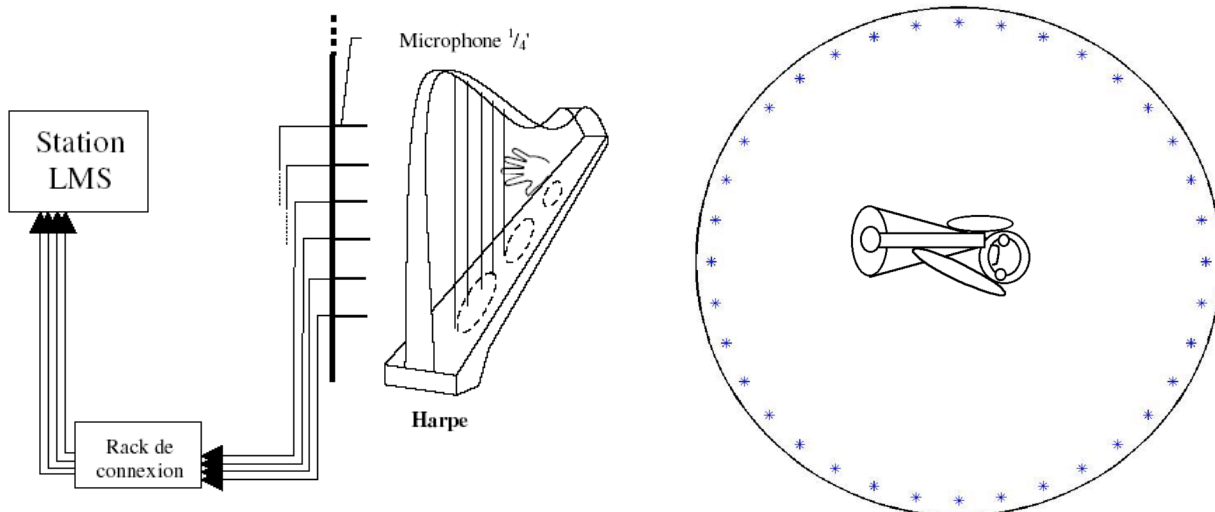


Figura 16: Esquema do aparato experimental para medida temporal da direcionalidade.



Figura 17: Fotografia do aparato experimental na medida temporal da direcionalidade.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foram feitas medidas de direcionalidade em uma harpa de concerto em regime estacionário no domínio da frequência. Em baixas frequências (abaixo de 300 Hz) confirmaram-se estudos realizados no LAUM que indicavam que a harpa funciona basicamente como um dipólo com a tábua de harmonia e a caixa acústica atuando como monopólos em oposição de fase. Em frequências mais elevadas, constatou-se que são necessários vários monopólos para representar a direcionalidade de padrões mais complexos da harpa. Utilizou-se o método das fontes elementares para obter os modelos.

Resta fazer uma análise sistemática para caracterizar a harpa em toda a faixa de funcionamento utilizando as ferramentas implementadas neste estudo. Já foram iniciados estudos sobre a otimização do número e do posicionamento das fontes para cada faixa de frequências.

Foram feitas também medidas temporais com a harpa tocada por uma harpista, mas a análise destas medidas ainda não foi realizada. Espera-se poder investigar o efeito de espacialização

temporal dinâmica com estes dados. O estudo da direcionalidade em regime estacionário deverá auxiliar na interpretação dos fenômenos de direcionalidade temporal.

Esta é uma pesquisa em andamento e deverá ter continuidade através de novos trabalhos de graduação, dissertações e teses. O trabalho foi desenvolvido em colaboração entre o Laboratório de Vibroacústica da UNICAMP e o Laboratoire d'Acoustique da Université du Maine (França). Futuramente, espera-se poder desenvolver fontes eletroacústicas de direcionalidade capazes de reproduzir o comportamento direcional da harpa.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos aos alunos E. Boboeuf e F. Grignon da Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, que realizaram as medidas como parte de seu trabalho de graduação e ao Centre de Transfert de Technologie du Mans por ter cedido suas instalações, sua instrumentação e a orientação de seu corpo técnico para a realização das medições. O primeiro autor agradece ainda o apoio da CAPES, que financiou sua estada no LAUM em estágio pós-doutoral.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., Sanders, J.V., *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, 1982, 524p.
- [2] Meyer, J., *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, Frankfurt: Verlag das musikinstrument, 1980. 259p.
- [3] Mannis, J.A., *Elementos de Acústica de Salas, Tomada e Projeção do Som na Performance Eletroacústica*, monografia do Programa de Doutorado em Música da UNICAMP, 2003, 27p.
- [4] Jeong, C.-H., Ih, J.-G., *Modeling of Sound Fields Considering the Acoustical Characteristics of Korean Traditional Musical Instruments*, Proc. Internoise, 2003, Seogwipo, Korea, 8p.
- [5] Hill, T.J., Richardson, B.E., Richardson, S.J., *Acoustical Parameters for the Characterisation of the Classical Guitar*, Acta Acustica, Vo. 90, 2004, pp. 335-348.
- [6] Stepanek, J., Otcenasek, Z., *Sound Directivity Spectral Spaces of Violins*, Proc. ISMA 2001, Perugia, Italy, pp. 133-136.
- [7] Curtin, J., *The Violin Finally Speaks*, The Strad, April 2000, pp. 390-394.
- [8] Zwicker, Eberhard, Fastl, Hugo, *Psychoacoustics Facts and Models*, Springer Series in Information Sciences, Vol. 22, 2nd Ed., 1999, 416 p.
- [9] Hughes WO, McNelis ME, *Recent advances in vibroacoustics*, Sound and Vibration, 2002, 36 (6), pp. 20-27.
- [10] *Boundary Element in Acoustics: Fundamentals and Computer Codes*, Editor T.W. Wu, WIT Series on Advances in Boundary Elements, Vol. 7, 2000.
- [11] Pinho, M.E.V.; Arruda, J.R.F., *On The Use of the Equivalent Source Method for Nearfield Acoustic Holography*. Anais do 17th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2003), ABCM, São Paulo, SP, Nov. 10-14, 2003. CD-ROM, paper 0503, 10 p.
- [12] Magalhaes MBS, Tenenbaum RA, *Sound sources reconstruction techniques: A review of their evolution and new trends* Acta Acustica 90 (2), 2004, pp. 199-220.
- [13] Nelson, P.A., Yoon, S.H., *Estimation of acoustic source strength by inverse methods: part II, experimental investigation of methods for choosing regularization parameters*, Journal of Sound and Vibration, 2000(a), 233(4), pp 669-705.

# ANALISE COMPARATIVA DOS DIFUSORES DE SCHROEDER COM A ORGANIZAÇÃO SERIAL NA TÉCNICA DE COMPOSIÇÃO COM 12 NOTAS DE SCHOENBERG: PROPOSTA DE MÉTODOS PARA *DESIGN* DE DIFUSORES ACÚSTICOS

**José A. Mannis\* & Jonatas Manzolli\*\***

\*Departamento de Música, IA / Centro de Documentação de Música Contemporânea - Unicamp

\*\*Departamento de Música, IA / Núcleo Interdisciplinar de Comunicação Sonora - Unicamp

e-mail : jamannis@uol.com.br, jonatas@nics.unicamp.br

Resumo: Apresentação da técnica de composição com doze notas de Schoenberg. A análise da estrutura dos difusores de Schroeder em comparação com a técnica de composição com 12 notas de Schoenberg mostram que quando o difusor possui estrutura complexa e, ao invés de repetições idênticas ou retrógrados, adota algoritmos que resultam numa série de N elementos (N é inteiro e número primo), induzidos de forma que seqüencialmente temos o Original seguido da sua Inversão, o desempenho do difusor é melhor. Com base nos aspectos positivos dos difusores de Schroeder bem como em trabalhos e experimentos no campo da difusão de ondas sonoras empregando outras técnicas que seqüências numéricas e que deram bons resultados, apresenta-se, ao final, novas propostas de design de estruturas de difusão.

## 1. COMPOSIÇÃO COM DOZE NOTAS<sup>1</sup>

Schoenberg formulou seu pensamento sobre a composição com doze notas em 1950, muito depois de ter escrito diversas obras com esse método. Basicamente, consiste no uso constante e exclusivo de uma série de 12 notas diferentes, na qual nenhuma delas é repetida antes de completar o total cromático. Por questões óbvias essa série não deve ser de modo algum idêntica à escala cromática (Figura 1), na qual o intervalo entre as notas da série é constante e igual a [1] (segunda menor). Ao contrário, a série deve conter alturas que formam entre si variados intervalos.

B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

alturas da série											
B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m	2 <sup>a</sup> m
intervalos entre as notas da série											

Figura 1: 11 notas do total cromático (do a si = 0 a 11) Intervalos constantes e iguais a 1, segunda menor.

B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

1 SCHOENBERG, Arnold. *Stile e idea*. Tradução: Maria Giovanna Moretti e Luigi Pestalozza. Milano : Rusconi e Paolazzi, 1960. xlvii, 237p. (p.107-147, Composizione con dodici note) (ed. orig. New York : Philosophical Library, 1950)

alturas da série											
A	Bb	E	D	Eb	Db	G	F	F#	G#	B	C
10	11	5	3	4	2	8	6	7	9	0	1
1	-6	-2	1	-2	6	-2	1	2	-9	1	
2 <sup>a</sup> m↑	5 <sup>a</sup> dim↑	2 <sup>a</sup> ↑	2 <sup>a</sup> m↑	2 <sup>a</sup> ↑	5 <sup>a</sup> dim↑	2 <sup>a</sup> ↑	2 <sup>a</sup> m↑	2 <sup>a</sup> ↑	6 <sup>a</sup> ↑	2 <sup>a</sup> m↑	
intervalos entre as notas da série											

Figura 2: Série com vários intervalos.

Comparando a série da Figura 2 com a escala cromática (Figura 1), pode-se observar como a diversificação de intervalos enriquece a série e, conseqüentemente, seu potencial musical. Nesse exemplo observamos intervalos de 2<sup>a</sup>m (segunda menor), 2<sup>a</sup> (segunda maior), 5<sup>a</sup>dim (quinta diminuída), e 6<sup>a</sup> (sexta maior), ascendentes (↑) e descendentes (↓), que formam uma seqüência. Nessa seqüência, alguns termos aparecem tanto na forma ascendente quanto descendente (2<sup>a</sup>↓ e 2<sup>a</sup>↑ ; 5<sup>a</sup>dim↓ e 5<sup>a</sup>dim↑), e outros permanecem fixos (2<sup>a</sup>m↑ e 6<sup>a</sup>↓).

A Figura 3 ilustra uma variação ainda mais acentuada dos intervalos em dois segmentos [3, -2, -5, -1, 7, 4] e [4, -9, 2, 5, 1, -7]. O intervalo de 3<sup>a</sup>M (terça maior) [4] é comum a ambos. Os intervalos de 3<sup>a</sup>m (terça menor) [3] e de 6<sup>a</sup>M (sexta maior) [9] são equivalentes (inversão). Chamamos atenção para o fato particular de que o sentido ascendente-descendente dos intervalos se encontra também invertido de um segmento para outro.

B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

alturas da série											
E	G	F	C	B	F#	Bb	C#	D#	G#	A	D
5	8	6	1	0	7	11	2	4	9	10	3
3	-2	-5	-1	7	4	-9	2	5	1	-7	
3 <sup>a</sup> m↑	2 <sup>a</sup> ↓	4 <sup>a</sup> ↓	2 <sup>a</sup> m↓	5 <sup>a</sup> ↑	3 <sup>a</sup> M↑	6 <sup>a</sup> M↓	2 <sup>a</sup> ↑	4 <sup>a</sup> ↑	2 <sup>a</sup> m↑	5 <sup>a</sup> ↓	
intervalos entre as notas da série											

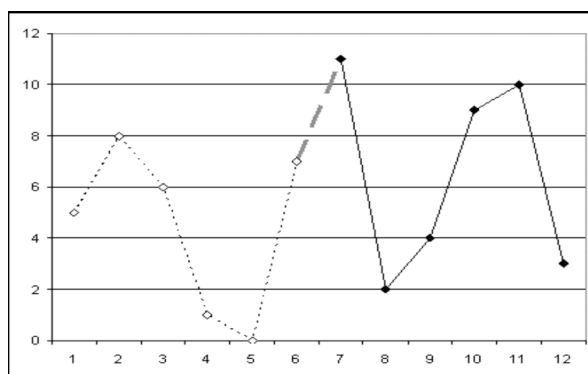


Figura 3: Série com variação de intervalos.

O gráfico acima evidencia a simetria da distribuição das alturas percebidas pelo ouvinte. O eixo vertical é então logarítmico e representa a freqüência das notas musicais.

Até aqui consideramos o âmbito da série compreendido dentro de uma oitava [0 a 11]. Ampliando esse âmbito, temos, no exemplo a seguir, a série do segundo movimento da Sinfonia, op.21 de Anton Webern. Observe como o segundo segmento é a exata inversão do primeiro. Isso confere à série propriedades importantes para a estruturação e a unidade da composição.

G	G#	A	Bb	B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb	B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24

alturas da série											
F	Ab	G	F#	Bb	A	Eb	E	C	C#	D	B
10	13	0	11	3	14	20	9	17	6	19	16
3	-13	11	-8	11	6	-11	8	-11	13	-3	
3ªm↑	9ªm↓	7ªM↑	6ªM↓	7ªM↑	5ªdim↑	7ªM↓	6ªM↑	7ªM↓	9ªm↑	3ªm↓	
intervalos entre as notas da série											

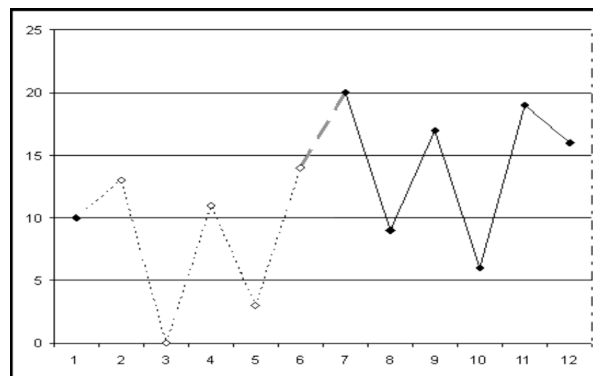


Figura 4: Série do segundo movimento da Sinfonia, op.21 - Anton Webern

O pivô A-Eb (intervalo de 5ªdim) articula dois segmentos de série perfeitamente simétricos em relação ao eixo da frequência (inversão). Os mesmos intervalos do primeiro segmento aparecem no segundo com sinal invertidos (sentido ascendente-descendente oposto).

### 1.1. Séries derivadas da série fundamental

Da série fundamental [O] derivam-se automaticamente três outras séries: sua inversão [I], seu retrógrado [R] e o retrógrado da inversão [RI], todas compreendidas no quadro abaixo.

B	C	C#	D	Eb	E	F	F#	G	G#	A	Bb
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	5	8	6	1	0	7	11	2	4	9	10	3
1	2	5	3	10	9	4	8	11	1	6	7	0
2	4	7	5	0	11	6	10	1	3	8	9	2
3	9	0	10	5	4	11	3	6	8	1	2	7
4	10	1	11	6	5	0	4	7	9	2	3	8
5	3	6	4	11	10	5	9	0	2	7	8	1
6	11	2	0	7	6	1	5	8	10	3	4	9
7	8	11	9	4	3	10	2	5	7	0	1	6
8	6	9	7	2	1	8	0	3	5	10	11	4
9	1	4	2	9	8	3	7	10	0	5	6	11
10	0	3	1	8	7	2	6	9	11	4	5	10
11	7	10	8	3	2	9	1	4	6	11	0	5

Figura 5 – Quadro com a série original, todas suas transposições e séries derivadas.

No quadro geral de séries, as linhas da esquerda para a direita contém todas as transposições da séries na forma original  $[O_i]$ ; da direita para a esquerda os retrógrados  $[R_i]$ ; as colunas de cima para baixo contém as inversões  $[I_i]$ ; e de baixo para cima os retrógrados das inversões  $[RI_i]$ .

As séries foram todas adequadas a um único âmbito: B-Bb [0 a 11]

A série original  $[O_0]$  está na primeira linha: [5, 8, 6, 1, 0, 7, 11, 2, 4, 9, 10, 3]

Seu retrógrado  $[R_0]$ : [3, 10, 9, 4, 2, 11, 7, 0, 1, 6, 8, 5]

Sua inversão  $[I_0]$ : [5, 2, 4, 9, 10, 3, 11, 8, 6, 1, 0, 7]

O retrógrado da inversão  $[RI_0]$ : [7, 0, 1, 6, 8, 11, 3, 10, 9, 4, 2, 5]

A primeira transposição da série original  $[O_1]$  está na segunda linha:

[2, 5, 3, 10, 9, 4, 8, 11, 1, 6, 7, 0]

etc.

Segundo Schoenberg o emprego dessas formas espelhadas (nos domínios da freqüência e do tempo) corresponde ao princípio da percepção absoluta e unitária do espaço musical. Para Webern<sup>2</sup>, através dessas formas cria-se o maior número possível de relações para a 'série', atinge-se um alto grau de coerência, o que resulta numa grande inteligibilidade. Em outras palavras, fazer o máximo com o mínimo, obtendo dessa forma o maior grau de variação e, ao mesmo tempo, o maior grau de unidade.

2 WEBERN, Anton. *Chemin vers la nouvelle musique*. Paris : Jean-Claude Lattès, 1980. 170p.

S A T O R  
A R E P O  
T E N E T  
O P E R A  
R O T A S

Figura 6: Ditado latino<sup>3</sup>: O semeador Arepo mantém a obra num movimento circular.

## 2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DIFUSORES DE SCHROEDER E A ORGANIZAÇÃO SERIAL NA TÉCNICA DE COMPOSIÇÃO COM DOZE NOTAS DE SCHOENBERG

As seqüências de profundidades  $d_n$  dos difusores de Schroeder QRD, PR<sub>2</sub>D e PR<sub>3</sub>D possuem estruturas com simétricas semelhantes às da organização das séries original [O] e suas derivadas: inversão [I], retrógrado [R] e retrógrado da inversão [RI] e igualmente contém séries, como visto no item 2 onde a composição com doze notas consiste basicamente no uso constante e exclusivo de uma série de notas diferentes, na qual nenhuma delas é repetida antes de completar o total.

Para comparar um tipo de difusor com outro, adotaremos os mesmos dados para o *design* de cada um. Neste caso,

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{N \cdot 2}$$

$$\frac{\lambda_0}{2N} = cte \therefore d_n = kS_n$$

Portanto trabalharemos aqui somente com o parâmetro variante.

Para  $N=17$  geraremos as seqüências  $S_n$  para cada um dos tipos de difusores:

	QRD	PR <sub>2</sub> D	PR <sub>3</sub> D
$n$	$S_n$	$S_n$	$S_n$
1	0	-	-
2	1	2	3
3	4	4	9
4	9	8	10
5	16	16	13
6	8	15	5
7	2	13	15
8	15	9	11
10	13	1	16
11	13	2	14
12	15	4	8
13	2	8	7
14	8	16	4
15	16	15	12
16	9	13	2
17	4	9	6
1	1	1	1
...	...	...	...

As seqüências  $S_n$  podem ser comparadas às séries de alturas musicais.

Observa-se no QRD um eixo de simetria entre  $S_9$  e  $S_{10}$ , sendo o segmento de  $S_{10}$  a  $S_{17}$  o retrógrado de  $S_1$  a  $S_9$  o que faz dessa seqüência uma série de apenas 9 elementos {0,1,4,9,16,8,2,15,13}. Em consequência dessa simetria, a seqüência de diferenças  $[S_{n+1}-S_n]$  entre  $S_{10}$  e  $S_{17}$  é retrógrada e invertida em relação a  $S_1$  a  $S_8$ , com pivot [ 0 ] em  $S_9$ .

3 WEBERN, idem. p.145, conclusão de conferência proferida em 02/Mar/1932.

QRD		
$n$	$S_n$	$S_{n+1} - S_n$
1	0	1
2	1	3
3	4	5
4	9	7
5	16	-8
6	8	-6
7	2	13
8	15	-2
9	13	0
10	13	2
11	15	-13
12	2	6
13	8	8
14	16	-7
15	9	-5
16	4	-3
17	1	-1
1	0	1
2	1	...
...	...	...

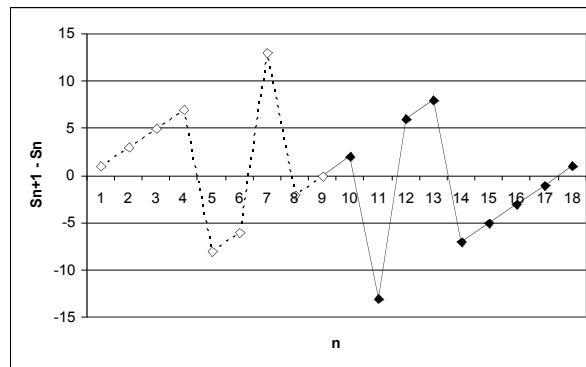
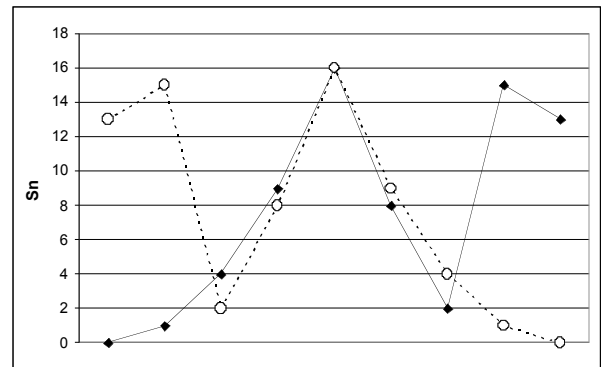
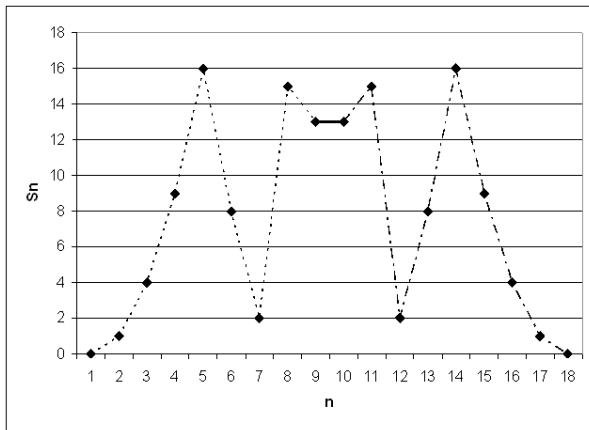


Figura 7: Seqüências  $S_n$  e  $S_{n+1}-S_n$  num QRD  $N=17$ . O primeiro gráfico mostra um claro retrógrado.

Em  $PR_2D$  a seqüência  $S_1$  a  $S_8$  se repete a partir de  $S_9$ , o que faz dela na verdade uma série de apenas 8 elementos  $\{2,4,8,16,15,13,9,1\}$ . Porém essa seqüência tem um eixo de simetria entre  $S_4$  e  $S_5$  sendo os termos  $S_5$  a  $S_8$  a exata inversão do segmento de  $S_1$  a  $S_4$ , ou seja,  $S_5 = N - S_1 = 17 - S_1$ ;  $S_6 = 17 - S_2$ ; etc. A seqüência  $S_{n+1} - S_n$  consiste em uma série de 4 elementos em  $S_1$  a  $S_4$  e  $S_9$  a  $S_{12}$  invertidos a partir de  $S_5$  e  $S_{13}$ .

PR<sub>2</sub>D

$n$	$S_n$	$S_{n+1} - S_n$
1	2	2
2	4	4
3	8	8
4	16	-1
5	15	-2
6	13	-4
7	9	-8
8	1	1
9	2	2
10	4	4
11	8	8
12	16	-1
13	15	-2
14	13	-4
15	9	-8
16	1	1
17	2	2
...	...	...

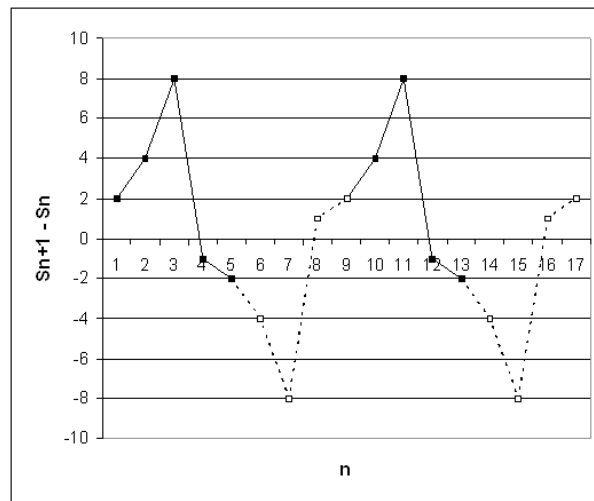
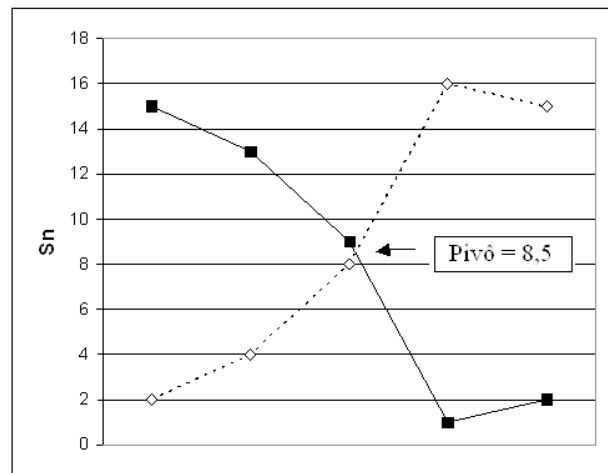
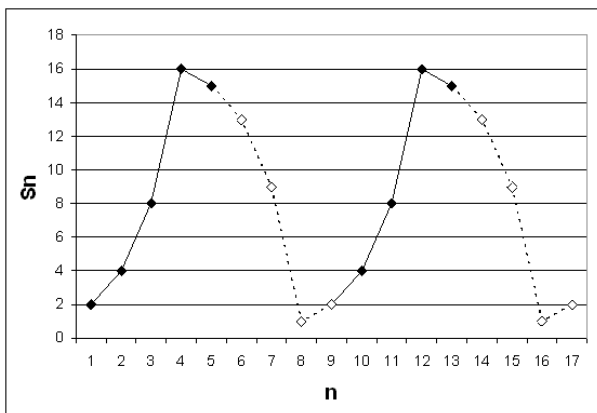


Figura 8: Sequências  $S_n$  e  $S_{n+1} - S_n$  num PR<sub>2</sub>D  $N=17$ .

Em PR<sub>3</sub>D a seqüência  $S_1$  a  $S_{16}$  é de fato uma série de 16 elementos {3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1} na qual o segmento de  $S_9$  a  $S_{16}$  é a exata inversão do segmento  $S_1$  e  $S_8$ . Observe que a seqüência  $S_{n+1} - S_n$  constitui uma série de 8 elementos que reaparece invertida a partir de  $S_9$ . A organização dessas profundidades tem a mesma estrutura que a das séries do segundo movimento da Sinfonia, op.21 de Anton Webern (v. Figura 4).

**PR<sub>3</sub>D**

$n$	$S_n$	$S_{n+1} - S_n$
1	3	6
2	9	1
3	10	3
4	13	-8
5	5	10
6	15	-4
7	11	5
8	16	-2
9	14	-6
10	8	-1
11	7	-3
12	4	8
13	12	-10
14	2	4
15	6	-5
16	1	2
17	3	6

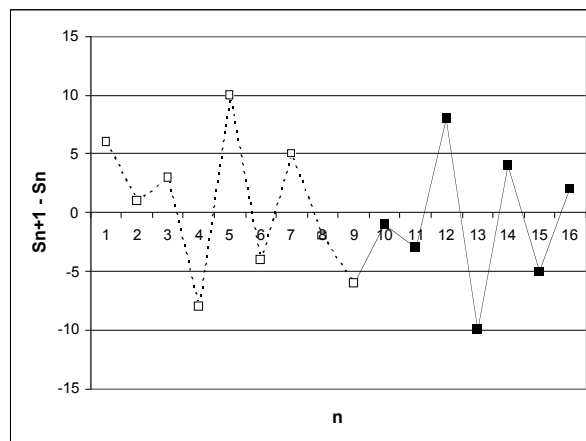
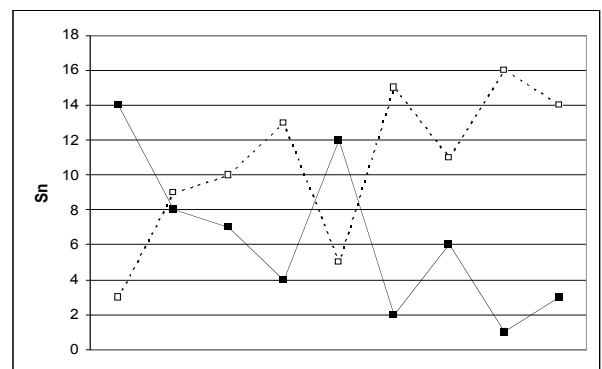
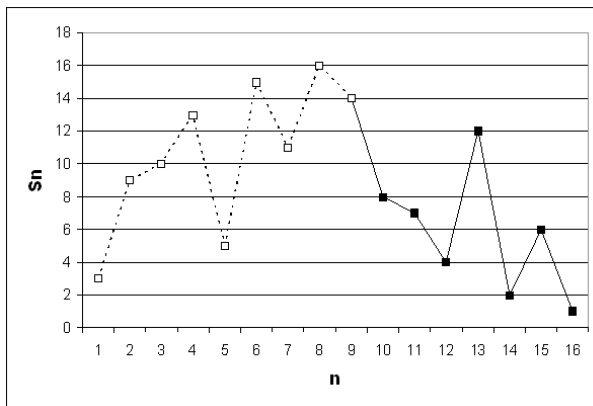


Figura 9: Sequências  $S_n$  e  $S_{n+1} - S_n$  num PR<sub>3</sub>D  $N=17$ .

A distribuição das profundidades no PR<sub>3</sub>D possui uma complexidade maior do que nos QRD e PR<sub>2</sub>D, onde a estrutura destes acaba sendo mais redundante. No PR<sub>3</sub>D temos uma série com 16 elementos, contra 9 no QRD e 8 no PR<sub>2</sub>D. A sequência de diferenças procura mostrar a variedade de articulações entre as cavidades. No PR<sub>3</sub>D e no QRD a sequência de diferenças contém uma série de 8 elementos, e no PR<sub>2</sub>D 4 elementos, ou seja, no PR<sub>3</sub>D e no QRD as cavidades se articulam de 8 maneiras diferentes, enquanto no PR<sub>2</sub>D de 4 maneiras diferentes. Ou seja, a variedade de relações internas entre as cavidades num PR<sub>3</sub>D é maior do que num QRD, que por sua vez é maior do que num PR<sub>2</sub>D. Vendo exclusivamente sob esta ótica, essa riqueza de relações internas poderia estar associada a um desempenho melhor, uma vez que o difusor estaria impondo à onda incidente situações mais variadas de diferença de fase. Acrescente-se a isso que os efeitos parciais de profundidades de cavidades múltiplas inteiras de 1/2 comprimento de onda, bem como o de absorção por ressonância por 1/4 de comprimento de onda, sejam mais marcantes nos PR<sub>2</sub>D e QRD e mais atenuados e distribuídos no PR<sub>3</sub>D.

### 3. PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE *DESIGN* DE DIFUSORES A PARTIR DAS PROPRIEDADES ANALISADAS

#### 3.1. Implementações para o *design* de difusores de Schroeder

Como visto acima, uma seqüência  $S_n$  em módulo  $N$  pode ser considerada uma a série de números inteiros de  $a_1$  a  $a_{N-1}$  onde não há repetição de nenhum termo antes de esgotar a série inteira. Por exemplo, tomando a base 10, uma série de 9 termos seria uma seqüência de 9 inteiros composta de 1 a 9, como  $\{2,7,8,4,1,9,3,5,6\}$  ou  $\{9,3,8,4,5,6,2,7,1\}$  ou  $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$ . A diferença entre elas seria o número de relações internas que cada uma possui. A terceira é extremamente redundante, pois a diferença entre os termos é sempre a mesma e igual a 1. A segunda tem estrutura simétrica de inversão com pivô em 5 ( $9+1 = 3+7 = 8+2 = 4+6 = 5+5 = 10$ ). A primeira tem maior variedade de diferenças de profundidade entre as cavidades adjacentes  $S_{n+1} - S_n$   $\{5,1,4,3,8,6,2,1\}$ . Justamente a técnica de composição com 12 notas baseia-se numa série gerativa de toda uma obra. Esta série necessita então ser estruturada de tal forma que por um lado possua ou gere um máximo de relações possíveis e por outro que tenha propriedades que serão exploradas no decorrer da obra. Nesse sentido dificilmente uma série como  $\{1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$  seria adotada, o que equivaleria à uma escala cromática, como na Figura 1. Há, portanto, tanto em arte como nas ciências uma certa exigência de elegância em análise, demonstração, síntese e implementações decorrentes.

Pode-se dizer que a estrutura de um PR<sub>3</sub>D para  $N=17$  seja uma série de inteiros não repetidos de 1 a 16 com a propriedade de possuir um eixo de simetria entre o 8º e o 9º termos, sendo seu segundo segmento a inversão do primeiro. Dessa forma, para os mesmos parâmetros de *design* de um difusor PR<sub>3</sub>D várias séries  $S_n$  poderiam ser encadeadas eliminando assim o efeito de periodicidade.

Aproveitando as propriedades da série do PR<sub>3</sub>D, para gerar uma série bastaria determinar os primeiros 8 elementos, sendo os demais obtidos pela inversão desses, ou seja,  $a_{i+8} = 17 - a_i$ . Por exemplo, dos primeiros oito termos  $\{3,9,10,13,5,15,11,16\}$  pode-se deduzir os restantes  $\{14,8,7,4,12,2,6,1\}$  obtendo a série total I  $\{3,9,10,13,5,15,11,16, 14,8,7,4,12,2,6,1\}$ . Esta é a mesma série que ilustra a Figura 9.

Para outros oito termos iniciais  $\{13,7,9,3,16,11,15,5\}$  temos outra série completa II  $\{13,7,9,3,16,11,15,5,4,10,8,14,1,6,2,12\}$  com as mesmas propriedades.

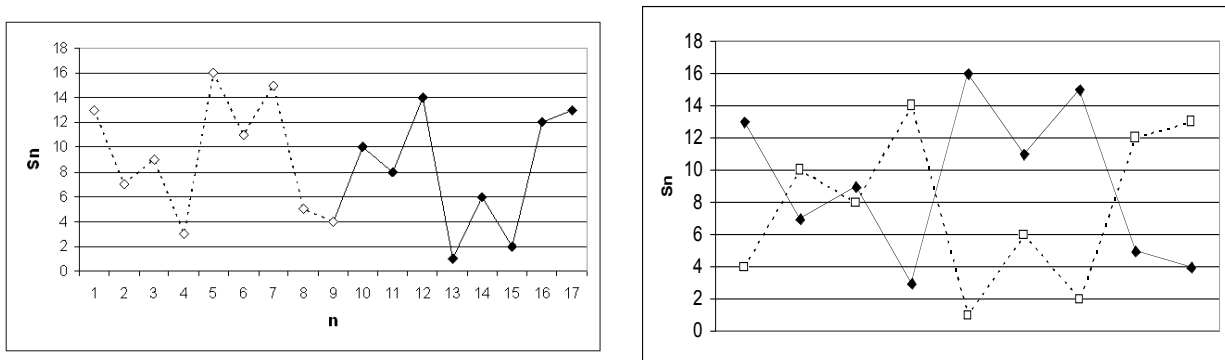


Figura 10: Série II

Permutando os termos ímpares na primeira série entre os primeiros oito termos e sua inversão, temos  $\{1,11,2,5,4,10,8,14,16,6,15,12,13,7,9,3\}$  e com pequenas alterações III  $\{1,11,2,10,4,5,9,14,16,6,15,7,13,12,8,3\}$  temos uma outra série com  $S_{n+1}-S_n$  todos diferentes.

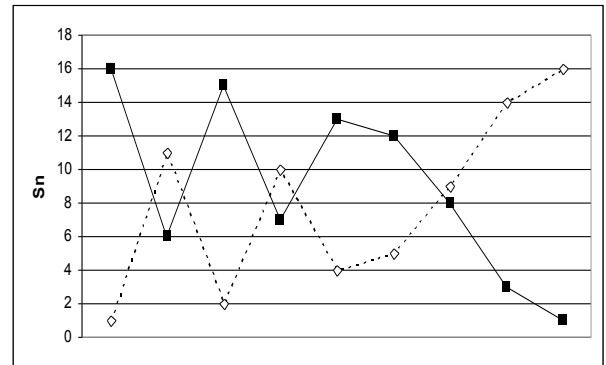
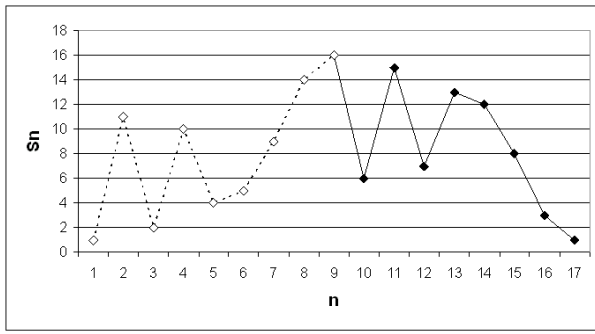


Figura 11: Série III

Obtemos assim três séries  $S_n$  que poderiam ser encadeadas atenuando o efeito de repetição

I-III

{3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1;13,7,9,3,16,11,15,5,4,10,8,14,1,6,2,12; 1,11,2,10,4,5,9,14,16,6,15,7,13,12,8,3}.

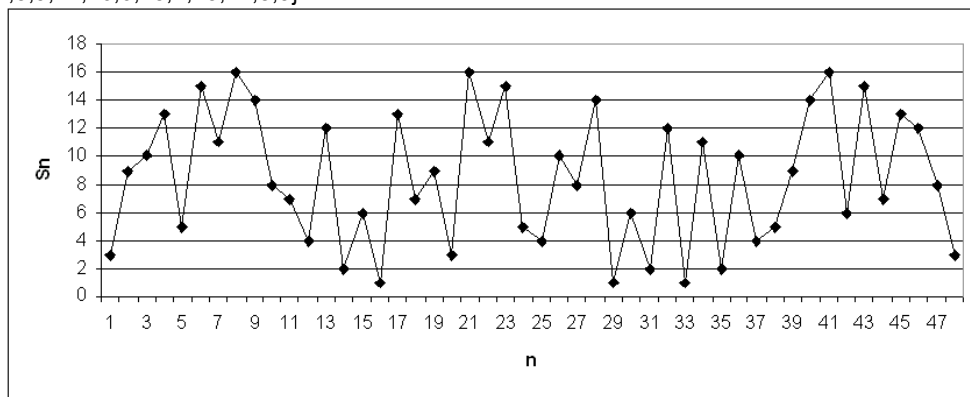


Figura 12: Séries I-III

Essa macro-série, por sua vez, poderia ser invertida<sup>4</sup>

(I-III)inv

{14,8,7,4,12,2,6,1,3,9,10,13,3,15,11,16;4,10,8,14,1,6,2,12,13,7,9,3,16,11,15,5;16,6,15,7,13,12,8,3,1,11,2,10,4,5, 9,14}

e encadeada com a original:

I-III; (I-III)inv

{3,9,10,13,5,15,11,16,14,8,7,4,12,2,6,1;13,7,9,3,16,11,15,5,4,10,8,14,1,6,2,12;1,11,2,5,4,10,9,14,16,6,15,12,13,7 ,8,3,14,8,7,4,12,2,6,1,3,9,10,13,3,15,11,16;4,10,8,14,1,6,2,12,13,7,9,3,16,11,15,5;16,6,15,7,13,12,8,3,1,11,2,10,4 ,5,9,14}.

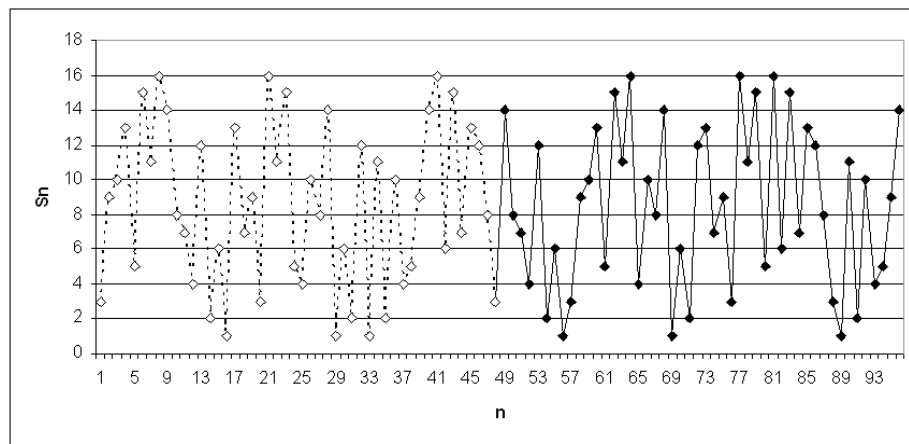


Figura 13: Série I-III; (I-III)inv

4 ANGUS, James A. S. Large area diffusers using modulated phase reflection gratings. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 98, 1995, Paris. Preprint 3954. [p.6]

à segunda metade poderia ser adicionado<sup>5</sup> 10 (mod 17) eliminando os fragmentos retrogradados “ao pé da letra” gerados pelas duplas inversões. Na técnica de composição com doze sons, essa adição equivaleria a uma transposição da série original.

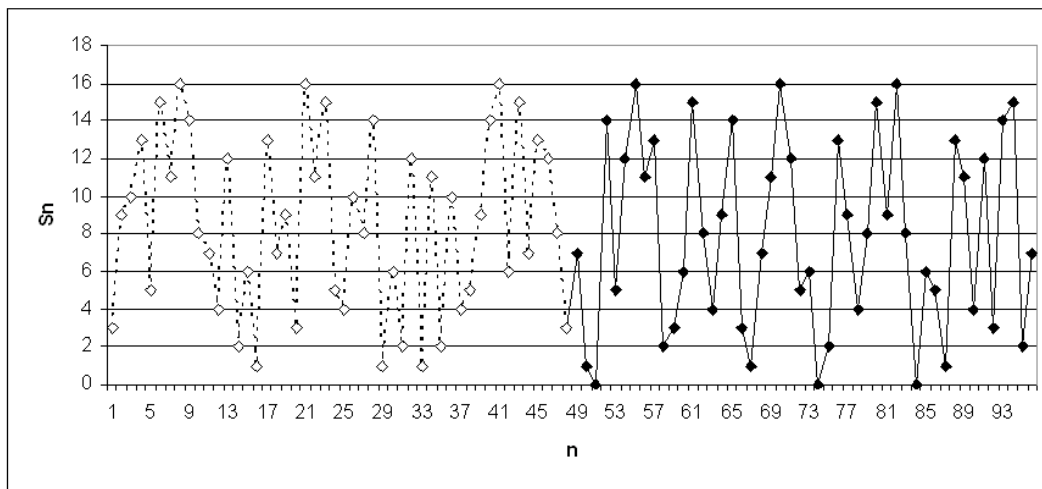


Figura 14 - Série I-III; 10+(I-III)inv (mod 17)

e, em seguida, o todo encadeado com seu retrógrado também adicionado de 10 (mod 17).

### I-III; 10+(I-III)inv (mod 17); 10+(I-III; 10+(I-III)inv (mod 17))ret (mod 17)

São inúmeras as possibilidades e sempre as propriedades e a coerência das séries originais  $S_{n+1}-S_n = k$  ou  $S_{n+1}-S_n = 17-k$  (diferença invertida) foram respeitadas e mantidas.

Com base numa macro-série como acima mais uma outra seqüência de profundidades de um difusor com características diferentes ( $f_0$ ,  $N$ , tipo QR / PR<sub>2</sub> / PR<sub>3</sub>), uma modulação entre os dois difusores poderia ser realizada conforme esquemas propostos por ANGUS<sup>6 7 8</sup>.

Se também adotarmos um  $f_{max}$  diferente para o novo difusor, teremos igualmente uma variação da largura da cavidade  $W$ , ou então  $W$  poderia ser modulado, dada uma diferença de âmbito  $f_{max2} - f_{max1}$  e aplicando-se a  $W$  uma seqüência  $S_n$  tal que :

$$W_n = \frac{c}{2 \left( f_{max1} + \frac{S_n}{N} (f_{max2} - f_{max1}) \right)}$$

ou seja, para cada cavidade teremos um  $S_n$  que definirá uma porcentagem da diferença de âmbito  $f_{max2} - f_{max1}$  afetando proporcionalmente o estreitamento da largura  $W$ . Este recurso seria mais facilmente aplicado a difusores unidimensionais, visto que nos bidimensionais uma mesma cavidade necessita ter a mesma largura na seqüência de sua linha como na seqüência de sua coluna.

## 3.2. Qualidades exigidas de um difusor

Um difusor acústico ideal deve ter as seguintes propriedades<sup>9</sup>:

- Produzir através da reflexão o espalhamento da onda incidente com distribuição direcional de intensidade uniforme;
- A energia acústica incidente deve ser refletida sem nenhuma perda de energia;

Os difusores de Schroeder cumprem bem a primeira propriedade, porém, absorvem energia:

- por causa do grande aumento de velocidade das partículas no interior e justo acima do difusor<sup>10</sup>;

5 COX, Trevor, D'ANTONIO, Peter. Schroeder diffusers: a review. **Building Acoustics**, vol.10, nº1, 2003. p.1-32 [p.9]

6 ANGUS, J. A. S. Using modulated phase reflection gratings to achieve specific diffusion characteristics. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 99, 1995, New York. **Preprint** 4117.

7 ANGUS, J. A. S. Wideband two dimensional diffusers using orthogonal modulated sequences. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 103, 1997, New York. **Preprint** 4640.

8 ANGUS, J. A. S. Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, June 2000. p.143-165.

9 TAKAHASHI, D. A design method for optimum acoustic diffusers. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. p.183-190 [p.184]



- devido ao fluxo de partículas com velocidade incrementada entre uma cavidade e outra para igualar a pressão na entrada do difusor<sup>11</sup>;
- devido ao alto fluxo de energia na entrada das cavidades, entre aquelas que estão em ressonância e as que não estão em ressonância; e à absorção por ressonância de 1/2 de onda, sobretudo se as cavidades são estritas<sup>121314</sup>;

Numa pequena sala, onde as reflexões ocorrem muito rapidamente devido às pequenas dimensões do local, uma absorção de 5dB<sup>15</sup> a 10dB<sup>16</sup> produz um caimento demasiadamente acentuado ao som, interferindo assim num parâmetro fundamental para a performance musical, o preenchimento do som<sup>17 18 19</sup>.

Portanto, devemos investigar outros tipos de difusores nos quais não ocorra absorção de energia e que possam produzir um espalhamento de energia satisfatório.

### 3.3. Exemplo de difusor com melhor desempenho que os de Schroeder

Comparando um difusor unidimensional QRD,  $N=13$ ,  $N.W=1m$ ,  $d_{max}=30cm$ <sup>20</sup>, ou seja,  $f_0 \sim 527Hz$  e  $f_{max} \sim 2228Hz$ ,  $W=7,7cm$  com um difusor composto por arcos cilíndricos com período de 1m e profundidade máxima de 20cm (Figura 15), FUJIWARA<sup>21</sup> obteve resultados indicando que o difusor com arcos cilíndricos distribui a energia de maneira mais uniforme que o QRD em todas as frequências e, particularmente em 1KHz e 4KHz, a distribuição do difusor com arcos é muito melhor que no QRD.

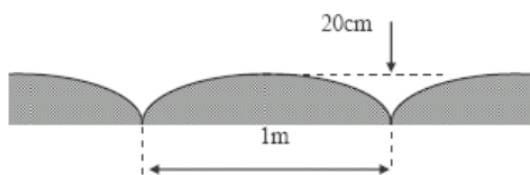


Figura 15 – Difusor de arcos cilíndricos.

MASUDA e FUJIWARA<sup>22</sup> comparando duas superfícies periódicas, ambas com período de 1m e altura máxima de 20cm, uma porém com perfil cilíndrico e outra triangular, obtém melhores resultados com o perfil cilíndrico do que com o triangular, considerando ambas tanto finitas quanto infinitas, notadamente nos lóbulos de difusão no mesmo quadrante da onda incidente, onde o difusor triangular apresenta atenuação na distribuição de energia.

Conforme os resultados obtidos nos estudos acima, conclui-se que os difusores com perfil cilíndrico permitem de fato uma melhor qualidade de difusão.

<sup>10</sup> FUJIWARA, Kyoji. Sound reflection and absorption of a QR-type Schroeder diffuser. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. Cap.21 p.211-217.

<sup>11</sup> EVEREST, F. Alton. **Sound studio construction on a budget**. New York (EUA): McGraw-Hill, 1997. 298p. [p.154-156].

<sup>12</sup> FUJIWARA, K., MIYAJIMA, T. A study of the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser. **Acustica**, vol.81, 1995. p.370-378.

<sup>13</sup> WU, T., COX, T. J., and LAM, Y. W. A profiled structure with improved low frequency absorption. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.110, n°\_, 2001. p.3064-3070.

<sup>14</sup> WU, T., COX, T. J., and LAM, Y. W. From a profiled diffuser to an optimised absorber. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.108, n°2, 2000. p.643-650.

<sup>15</sup> FUJIWARA, K., MORIYASU, N., A study on the absorption coefficient of a practically constructed Schroeder diffuser at normal incidence. **Proceedings Inter-noise 93**. Vol.III, p.1703 (1993).

<sup>16</sup> EVEREST, F. Alton. **Sound studio construction on a budget**. New York (EUA): McGraw-Hill, 1997. 298p. [p.154-156].

<sup>17</sup> BERANEK, Leo L. **Music, acoustics & architecture**. New York: John Wiley & Sons, 1962. 585p.

<sup>18</sup> MALAFAIA, Soraia F., TENENBAUM, Roberto A. Estudo psicoacústico dos parâmetros utilizados para caracterizar a qualidade acústica de salas de concerto. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19, 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p.318-323.

<sup>19</sup> MANNIS, José A. Intérprete do som: Bases interdisciplinares da performance eletroacústica : Tomada e projeção do som. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 1, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** p.10 ISBN:85-89029-01-8 (acompanha CD-ROM com texto completo)

<sup>20</sup> Para esses dados seria necessário  $N=17$  ( $N=2.m_{max}.f_{max}/f_0$ , sendo  $m_{max}=2$ )

<sup>21</sup> FUJIWARA, Kyoji. Sound reflection and absorption of a QR-type Schroeder diffuser. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. Cap.21 p.211-217 [p.212-213]

<sup>22</sup> MASUDA, K. Sound reflection from periodical uneven surfaces. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. p.191-201

### 3.4. Proposta de *design* de difusor a partir da organização serial e perfis arredondados

Considerando as qualidades exigidas de um difusor, conforme visto no item 0, a melhor performance de difusores com perfis arredondados (item 0) e as propriedades estruturais positivas das seqüências de números inteiros juntamente à organização serial pode-se imaginar uma superfície difusora irregular e arredondada com o objetivo de produzir difusão num largo âmbito de freqüências, inclusive evitando os modos normais de uma pequena sala.

Para isso, vamos generalizar a aplicação da organização serial, estendendo-a além de profundidades, para diversos parâmetros de irregularidades controladas de objetos como: dimensões, rotação horizontal (rotação sobre o eixo vertical; esquerda-direita), rotação vertical (rotação sobre o eixo horizontal; para cima - para baixo).

- **Rotação horizontal**  
 e = painel virado para a ESQUERDA  
 d = painel virado para a DIREITA  
 Série: {e, d}  
 Seqüência: {e,d,e,d,e,d,e,d...}
- **Rotação vertical**  
**F = painel inclinado para FRENTE**  
**T = painel inclinado para TRÁS**  
 Série: {F,T}  
 Seqüência: {F,F,T,F, T,T,F,T, F,T,F,F, T,F,T,T, T,F,T,F, F,T,F,T, F,T,T,F, T,F,F...}
- **Largura dos painéis**  
 G = painel GRANDE G1 (83 cm) G2 (71 cm)  
 M = painel MÉDIO M1 (61 cm) M2 (51 cm)  
 P = painel PEQUENO P1 (43 cm) P2 (37 cm)  
 Série: {G,M,P}  
 Seqüência: {G, M, P, G, G, G, M, P, P, M, G, P, M, M, P, G, G, G, M, P, M, P, P, M, G, G, P, M, G, G, M...}  
 Série: {2,1}  
 Seqüência: {2,1,1,2,1,1,2,2,2,2,1,1,2,1,1,2,1,1,1,2,2,1,2,1,2,2,1,2,1,2,1...}  
 Série composta : {G<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, G<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>}  
 Seqüência composta: {G<sub>2</sub>, M<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>, M<sub>2</sub>, G<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>...}

Reunindo todas as seqüências temos então a série geral composta:

$$\begin{matrix}
 F_e^{G_2} & F_d^{M_1} & T_e^{P_1} & F_d^{G_2} & T_e^{G_1} & T_d^{G_1} & F_e^{M_2} & T_d^{P_2} & F_e^{P_2} & T_d^{M_2} & F_e^{G_1} & F_d^{P_1} & T_e^{M_2} & F_d^{M_1} \\
 T_e^{P_1} & T_d^{G_2} & T_e^{G_1} & F_d^{G_1} & T_e^{M_1} & F_d^{P_2} & F_e^{M_2} & T_d^{P_1} & F_e^{P_2} & T_d^{M_1} & F_e^{G_2} & T^{563} & G_1^{61} & F_d^{P_1} & F_d^{M_2} \\
 T_e^{G_1} & F_d^{G_2} & F_e^{M_1} & & & & & & & & & & & & 
 \end{matrix}$$

### 3.5. Implementação da série geral

Na figura a seguir, vista superior da série de inclinações de placas.

- Na primeira seqüência a série simples acima com inclinações laterais de 10°.
- Na segunda seqüência a série simples acima com inclinações laterais de 20°.
- Na última seqüência da figura abaixo, foram inclinados blocos inteiros de placas (já inclinadas), um em relação a outro, obtendo-se assim efeito de difusão para comprimentos de onda maiores.

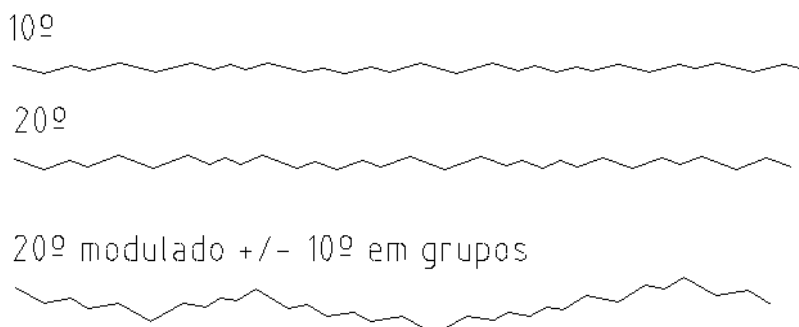


Figura 16: Vista superior das inclinações esq-dir das placas da parede de gesso duplo acartonado.

### 3.6. Inclinações frente-trás

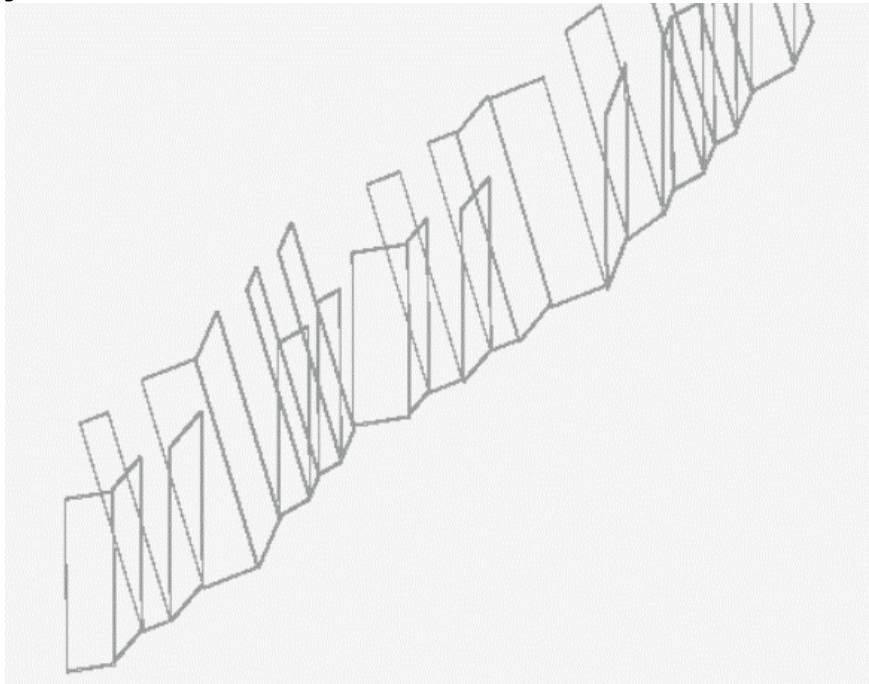


Figura 17: Na fileira de trás, placas somente com inclinação lateral. Na fileira adiante, as mesmas placas porém acrescentando inclinação frente-trás.

Ao produzir a inclinação frente-trás, abre-se um vão triangular entre as placas sucessivas. Posteriormente esse vão deve ser devidamente fechado com placas triangulares, sendo o vértice sempre apontado para baixo.

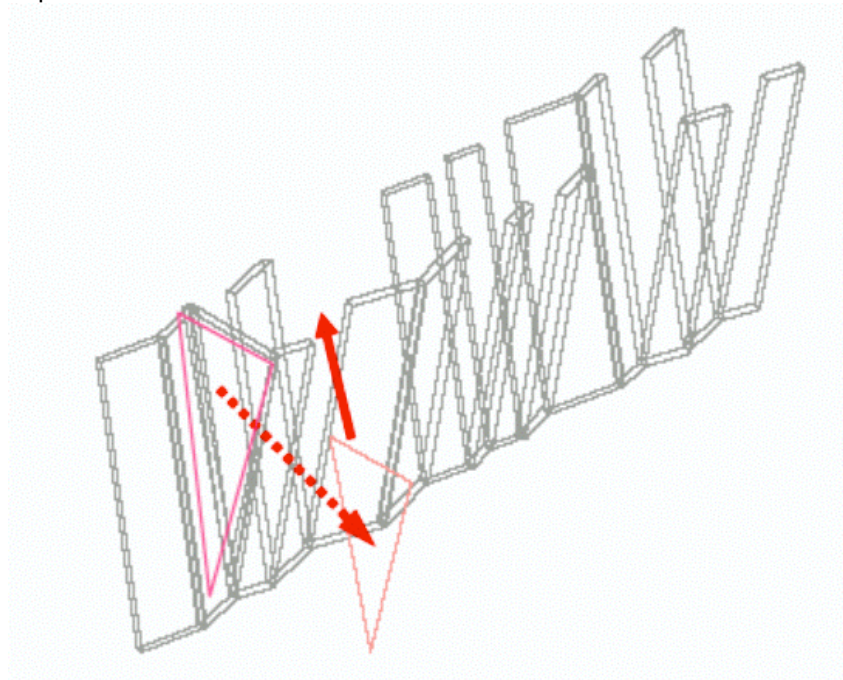


Figura 18 - Placa triangular para fechamento dos vãos.

Na figura a seguir pode-se observar algumas seqüências de placas triangulares sucessivamente. Essa alteração ocorreu para evitar alguns paralelismos entre placas triangulares fechando vãos resultantes das inclinações frente-trás.

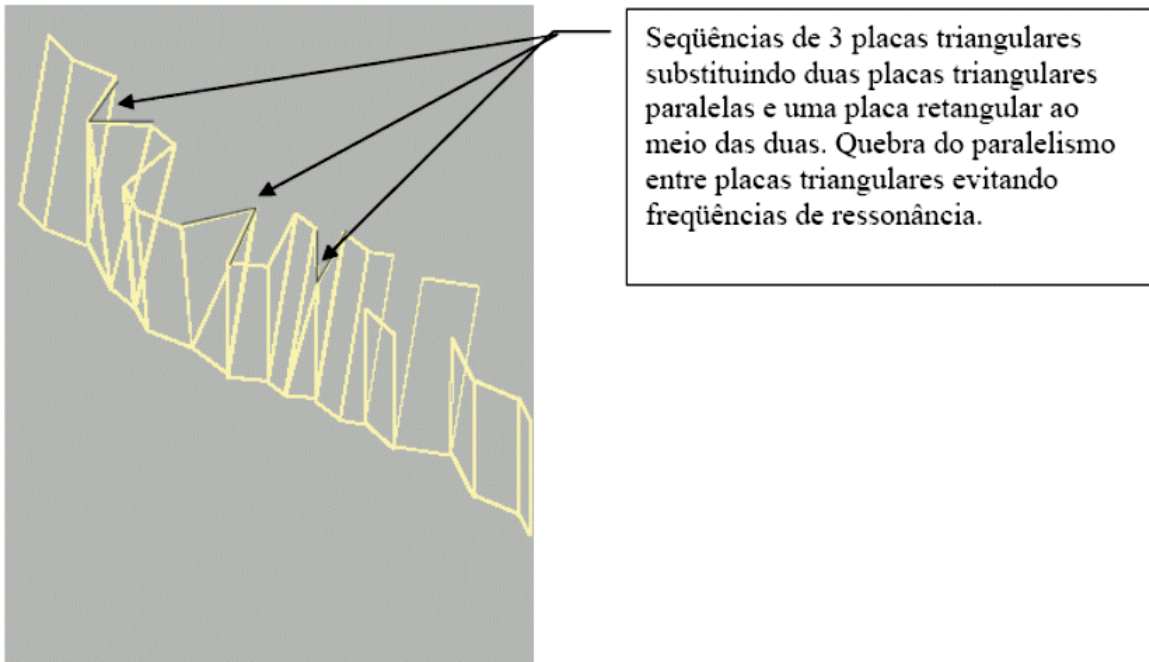


Figura 19 - Parede de gesso. À esquerda placas com espaços já preenchidos por placas triangulares. À direita ainda permanecem os vãos produzidos pela inclinação frente-trás.

Placas paralelas podem gerar modos normais derivados da distância  $L$  entre as placas e por isso devem ser evitadas.

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad f_2 = 2\frac{c}{2L} \quad \dots \quad f_n = n\frac{c}{2L}$$

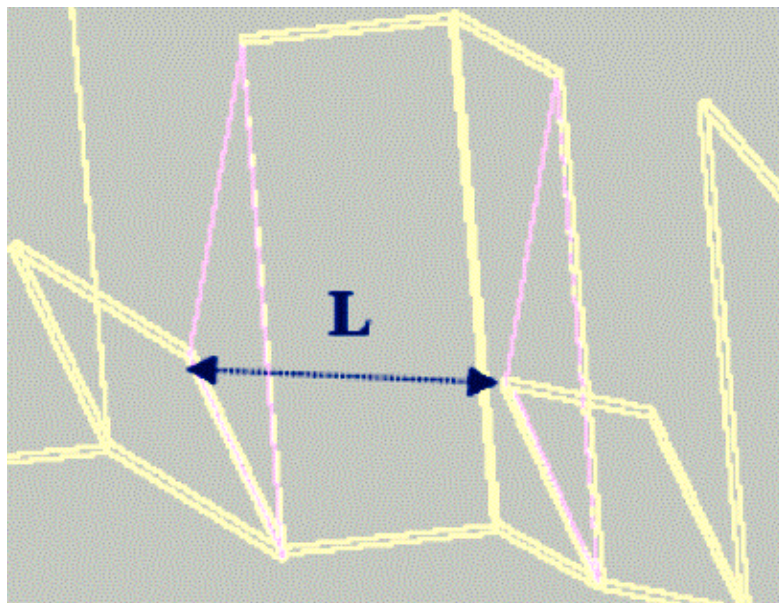


Figura 20: Placas de fechamento paralelas em roxo produzindo modos normais.

### 3.7 Procedimento para evitar paralelismo entre placas triangulares fechando vãos paralelos produzidos por inclinações frente-trás das placas principais

Ao invés da placa retangular  $P$  e suas respectivas placas de fechamento dos vãos  $F_e$  e  $F_d$  (em roxo), coloca-se um conjunto de três placas triangulares  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  (em vermelho) eliminando o paralelismo sem quebrar a continuidade da alternância de inclinações.

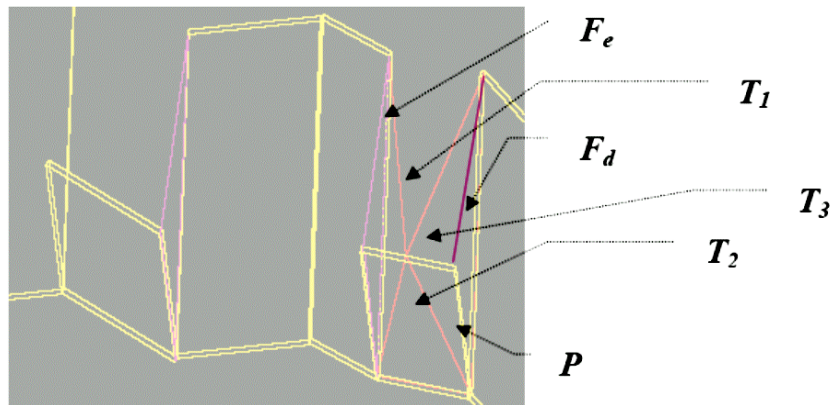


Figura 21: Conjunto de 3 placas triangulares (em vermelho) substituindo a placa retangular amarela e suas duas placas laterais de fechamento (roxas).

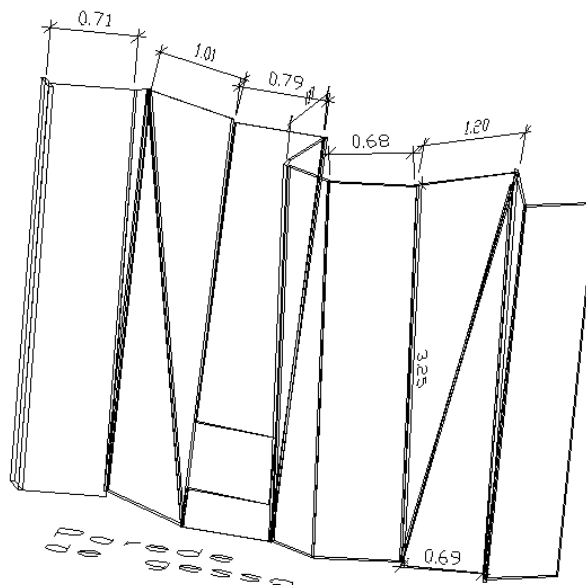


Figura 22: Parede de gesso: algumas dimensões.

Ao final, cada placa terá um perfil cilíndrico com profundidade  $h = 0,2L$ .

## 4. CONCLUSÕES

Superfícies como as duas últimas propostas não absorvem energia e portanto contribuem para a manutenção do preenchimento do som na performance musical. Suas inclinações gerais evitam o paralelismo com a partição oposta e, portanto, eliminam os modos normais de uma pequena sala. Seria necessário saber como elas reagiriam na difusão de médias e altas frequências para poder validar a proposta de paredes seriais em alternativa aos difusores de Schroeder e às superfícies periódicas.

## 5. REFERÊNCIAS

- ANDO, Y., KAGEYAMA, K. Subjective preference of sound with a single early reflection. **Acustica**, vol.37, nº2, März 1977. p.111-117.
- ANDO, Y., KATO, K. Calculations on the sound reflection from periodically uneven surfaces of arbitrary profile. **Acustica**, vol.35, nº5, August 1976. p.321-329.
- ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. 433p.
- ANDO, Yoichi. **Architectural acoustics: blending sound sources, sound fields, and listeners**. New York: Springer-Verlag, 1998. 252p.
- ANGUS, J. A. S. Using grating modulation to achieve wideband large area diffusers. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, June 2000. p.143-165.
- ANGUS, James A. S. Large area diffusers using modulated phase reflection gratings. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 98, 1995, Paris. **Preprint** 3954.
- ANGUS, J. A. S. Using modulated phase reflection gratings to achieve specific diffusion characteristics. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 99, 1995, New York. **Preprint** 4117.

- ANGUS, J. A. S. Wideband two dimensional diffusers using orthogonal modulated sequences. In: CONVENTION AUDIO ENGINEERING SOCIETY, 103, 1997, New York. **Preprint** 4640.
- ARRUDA, Fábio R., GUEDES, Renata, MÜLLER, Swen, BRANDÃO, Paulo C. R., NABUCO, Marco, ZINDELUK, Moisés, ROCHA, Renato O. A Influência da direcionalidade de fontes sonoras na avaliação experimental da qualidade acústica de salas. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19, 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p.312-317.
- BARRON, M. Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory. **Journal of Sound and Vibration**, vol.27, nº2, 1973. p.183-196.
- BARRON, M., LEE, L-J. Energy relations in concert auditoriums. I **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.84, nº2, August 1988. p.618-628.
- BERANEK, Leo L. **Acoustic measurements**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1949. 914p.
- BERANEK, Leo L. **Acoustics**. New York: Acoustical Society of America, 1993. 491p.
- BERANEK, Leo L. **Concert and opera halls: how they sound**. New York: Acoustical Society of America, 1996. 643p.
- BERANEK, Leo L. **Music, acoustics & architecture**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1962. 585p.
- CONDAMINES, Roland. **Stéréophonie** : cours de relief sonore théorique et appliqué. Paris : Masson, 1978. 301p.
- COOPER, Jeff. **Building a recording studio**. 5a. ed. Los Angeles (EUA): Synergy group inc., 1996. 209p.
- COX, T. J., AVIS, M. R., XIAO, L. The potential for room acoustic active diffusers. **Revista de Acústica**, vol.23, 2002. RBA-06-003-IP ISBN 84-87985-07-6 (<http://www.ia.csic.es/sea/forum/forum.htm>)
- COX, Trevor, D'ANTONIO, Peter. Schroeder diffusers: a review. **Building Acoustics**, vol.10, nº1, 2003. p.1-32
- D'ANTONIO, Peter & KONNERT, John H. The acoustical properties of sound diffusing surfaces: the time, frequency and directivity energy response. In: AES CONVENTION, 79., 1985 New York. **Proceedings...** 18p. [2295 (B-6)]
- D'ANTONIO, Peter & KONNERT, John H. The reflection phase grating diffusor: design theory and application. **J. Audio Eng. Soc.**, vol.32, nº4, April 1984. p.228-238.
- D'ANTONIO, Peter & KONNERT, John H. The RPG reflection phase grating acoustical diffusor: applications. In: AES CONVENTION, 76., New York, 1984. **Proceedings...** 8p. [2156 (H-7)]
- D'ANTONIO, Peter & KONNERT, John H. The Schroeder quadratic-residue diffusor: design theory and application. In: AES CONVENTION, 74., 1983, New York. **Proceedings...** 26p. [1999 (C-4)]
- D'ANTONIO, Peter, COX, Trevor J. Diffusor application in rooms. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, June 2000. p.113-142.
- DAVIS, Don & DAVIS, Carolyn. **Sound system engineering**. 2.ed. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1987. 665p.
- DE MARCO, Conrado Silva. **Elementos de acústica arquitetônica**. São Paulo: Nobel, 1982. 129p.
- EVEREST, F. Alton & SHEA, Mike. How build a small budget recording studio. 2a. ed. New York (EUA): TAB Books (division of McGraw-Hill), 1988. 295p.
- EVEREST, F. Alton. Acoustics of small rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988. Cap.3 p.41-60
- EVEREST, F. Alton. Acoustical design of audio rooms. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988. Cap.5 p.93-118
- EVEREST, F. Alton. Fundamentals of sound. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988. Cap.1 p.3-22
- EVEREST, F. Alton. Recordings studios design. In: BALLOU, Glen (Ed.) **Handbook for sound engineers** : the new audio cyclopedia. Indianapolis (EUA): Howard W. Sams & Co., 1988. Cap.6 p.119-154
- EVEREST, F. Alton. Sound studio construction on a budget. New York (EUA): McGraw-Hill, 1997. 298p.
- FARINA, Angelo. A new method for measuring the scattering coefficient and the diffusion coefficient of panels. **Acustica**, vol.86, nº6, Novembro/Dezembro 2000. p.928-942.
- FISCHETTI, A., JOUHANEAU, J. The Influence of first reflection distribution on the quality of concert halls. **Applied Acoustics**, vol.35, nº3, 1992. p.233-245.
- FUJIWARA, K. Sound absorber for low frequency with the aid of random phase interference. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, pp. 707-708 (1989) (in Japanese)
- FUJIWARA, K., MIYAJIMA, T. A study of the sound absorption of a quadratic-residue type diffuser. **Acustica**, vol.81, 1995. p.370-378.
- FUJIWARA, K., MIYAJIMA, T. Absorption characteristics of a practically constructed Schroeder diffuser of quadratic-residue type. **Applied Acoustics**, vol.35, 1992. p.149-152.
- FUJIWARA, K., MORIYASU, N., A study on the absorption coefficient of a practically constructed Schroeder diffuser at normal incidence. **Proceedings Inter-noise 93**. Vol.III, p.1703 (1993)
- FUJIWARA, K., MORIYASU, N., The absorption coefficient of QRD in the low frequency range. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, pp. 821-822. (1993)(in Japanese)
- FUJIWARA, K., NAKAI, K., TORIHARA, H. Visualization of the sound field around a Schroeder diffuser. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, June 2000. p.225-235.
- FUJIWARA, K., NAKAI, K., TORIHARA, H. Visualisation of the sound field around a Schroeder diffuser. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, 2000. p.225-236.
- FUJIWARA, Kyoji. Sound reflection and absorption of a QR-type Schroeder diffuser. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. Cap.21 p.211-217
- GEN-HUA, Dai, ANDO, Y. Generalized analysis of sound scattering by diffusing walls. **Acustica**, vol.53, nº6, Oktober 1983. p.296-301.
- GERGES, Samir N. Y. **Ruído** : fundamentos e controle. Florianópolis: S. N. Y. Gerges, 1992. 600p.
- JONG, B. A. de, BERG, P. M. van den. Teoretical design of optimum planar sound diffusers. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.68, nº4, October 1980. p.1154-1159.
- KINSLER, Lawrence E. & FREY, Austin R. **Fundamentals of acoustics**. 3.ed. New York : John Wiley & Sons, 1982. 480p.

- KNUDSEN, Vern O.& HARRIS, Cyril M. **Acoustical design in architecture**. 2.ed. New York : Acoustical Society of America, 1978. 408p.
- KUTTRUFF, H. Sound absorption by pseudostochastic diffusers (Schroeder diffusers) **Applied Acoustics**, vol.42, 1994. p.215-231.
- KUTTRUFF, Heinrich. **Room acoustics**. 4.ed. London: Elsevier Science Publisher, 2000.
- HARGREAVES, T. J., COX, T. J., LAM, Y.W., D'ANTONIO, P. Surface diffusion coefficients for room acoustics : free field measures. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.108, nº4, 2000. p.1710-1720.
- LEWERS, T. H., ANDERSON, J. S. Some acoustical properties of St. Paul's Cathedral, London. **Journal of Sound and Vibration**, vol.92, nº2, 1984, p.285-297.
- MANNIS, José A. Intérprete do som: Bases interdisciplinares da performance eletroacústica: Tomada e projeção do som. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE ÁUDIO, 1, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** p.10 ISBN:85-89029-01-8 (acompanha CD-ROM com texto completo)
- MASUDA, K. Sound reflection from periodical uneven surfaces. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. p.191-201
- MECHEL, F. P. The wide-angle diffuser – a wide angle absorber? **Acustica**, vol.81, nº\_\_, 1995, p.379-401.
- MILES, R. N. Sound field in a rectangular enclosure with diffusely reflecting boundaries. **Journal of Sound and Vibration**, vol.92, nº2, 1984, p.203-226.
- MOMMERTZ, Eckart. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. **Applied Acoustics**, vol.60, nº2, June 2000. p.201-203.
- ONITSUKA, H., and KAWAKAMI, F. Numerical study on the energy dissipation of diffusers. **Proc. Autumn Meet. Acoust. Soc. Jpn**, pp. 813-814 (1993) (in Japanese)
- ONITSUKA, H., and KAWAKAMI, F. Numerical study on the energy dissipation of diffusers. **Tec. Rep. Archit. Acoust. Soc. Jpn**, AA94-20 (1994) (in Japanese)
- ONITSUKA, Hirofumi, KAWAKAMI, Fukushi. Numerical study of energy dissipation in QR-diffusers. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. London: Academic Press, 1997. Cap.20 p.203-209
- SCHOENBERG, Arnold. **Stile e idea**. Tradução: Maria Giovanna Moretti e Luigi Pestalozza. Milano : Rusconi e Paolazzi, 1960. xvii, 237p.
- SCHOENBERG, Arnold. **Style and idea**. New York : Philosophical Library, 1950. vii, 224p.
- SCHROEDER, M. R. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls : more lateral sound diffusion. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.65, nº4, April 1979. p.958-963.
- SCHROEDER, Manfred R. New method of Measuring Reverberation Time. **J. Audio Eng. Soc.**, vol.37, nº3, March 1965. p.409-412.
- SCHROEDER, Manfred R. **Number theory in science and communication**: with applications in cryptography, physics, digital information, computing, and self-similarity. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 1997. (Spring series in Information Sciences, vol.7) 363p. (1.ed. em alemão, Berlin : Springer, 1984)
- SCHROEDER, Manfred R. Progress in architectural acoustics and artificial reverberation: concert hall acoustics and number theory. **J. Audio Eng. Soc.**, vol.32, nº4, April 1984. p.194-198.
- SEARS, Francis, ZEMANSKY, Mark W. & YOUNG, Hugh D. **Física: mecânica dos fluidos, calor, movimento ondulatório**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. v.2.
- SEPMAYER, L. W. Computed Frequency and Angular Distribution of the Normal Modes of Vibration in Rectangular Rooms. **J. Audio Eng. Soc.**, vol.37, nº3, March 1965. p.413-423.
- SMITH, PETERS, R. J., OWEN, S. **Acoustics and Noise Control**
- STRUBE, Hans Werner. Diffraction by a planar, locally reacting, scattering surface. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.67, nº2, February 1980. p.460-469.
- STRUBE, Hans Werner. Scattering of a plane wave by a Schroeder diffusor : a mode-matching approach. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.67, nº2, February 1980. p.453-459.
- TAKAHASHI, D. A design method for optimum acoustic diffusers. In: ANDO, Yoichi, NOSON, Dennis (Ed.) **Music and concert hall acoustics**. p.183-190
- TAKAHASHI, D. **J. Acoust. Soc. Jpn (E)**. 16, 51 (1995).
- TAKAHASHI, D. **Proc. Sabine Symposium**, p. 149. ASA, Boston (1994).
- TAKAHASHI, D. Theoretical investigation for sound absorption of QRD. **Tec. Rep. Archit. Acoust. Soc. Jpn**, AA94-3 (1994) (in Japanese).
- VALADARES, Victor M. Avaliação simplificada de desempenho acústico de salas utilizadas para concertos em Belo Horizonte. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA, 19, 2000, Belo Horizonte. **Anais...** p.487-492.
- WALKER, R. & BAIRD, M.D.M. **Modular acoustic diffuser** : the development and performance of a modular acoustic diffuser. Research and Development Report, BBC RD 1995/1. BBC Research & Development Department : Surrey, 1995.
- WATTERHOUSE, Richard V., COOK, Richard K. Interference Patterns in Reverberant Sound Fields. II **J. Audio Eng. Soc.**, vol.37, nº3, March 1965. p.424-428.
- WEBERN, Anton. **Chemin vers la nouvelle musique**. Tradução do alemão : Anne Servant, Didier Alluard, Cyril Huvé. Paris : Jean-Claude Lattès, 1980. 170p. (Collection Musiques et musiciens, dir. Odile Cail)
- WU, T., COX, T. J., and LAM, Y. W. A profiled structure with improved low frequency absorption. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.110, nº\_\_, \_\_\_\_ 2001. p.3064-3070.
- WU, T., COX, T. J., and LAM, Y. W. From a profiled diffuser to an optimised absorber. **J. Acoust. Soc. Am.**, vol.108, nº2, 2000. p.643-650.

# UMA INTRODUÇÃO À ACÚSTICA DA VOZ CANTADA

**Maurílio Nunes Vieira**  
Departamento de Física/ICEx/UFMG  
e-mail: maurilio@fisica.ufmg.br

Resumo: Este artigo é dedicado àqueles não-familiarizados com as ciências exatas, mas que têm interesse na acústica da voz e do canto. Ele faz uma breve introdução ao modelo Fonte-Filtro da produção de vogais e o utiliza no estudo de alguns aspectos do canto lírico feminino, do canto lírico masculino, do canto harmônico e do vibrato vocal. O texto foi escrito de forma sucinta, mas valendo-se de detalhamento nas figuras e em suas legendas.

## 1. ACÚSTICA DA PRODUÇÃO DA FALA

A fala humana utiliza sons produzidos de diversas maneiras. As consoantes fricativas, como o [f] e o [s], são articuladas com um estreitamento na passagem do ar. Este estreitamento ocorre entre o lábio inferior e os dentes superiores, no [f], e entre a língua e o alvéolo, no [s]. Para gerar o ruído de fricção característico das fricativas, há um aumento na pressão expiratória, o que torna o fluxo turbulento. Já nas consoantes plosivas, ou oclusivas (e.g., [p] ou [t]), o som é criado, como os nomes sugerem, pela rápida liberação de uma massa de ar comprimida em uma cavidade intraoral. Em vogais, por sua vez, o som é produzido exclusivamente pela fonação, ou vozeamento, isto é, pela vibração das pregas vocais. Esta vibração, que pode ser percebida apalpando-se o pescoço, também ocorre em consoantes vozeadas ([v], [z], etc.) e é o traço distintivo entre pares como [s][z], [f][v], ou [p][b]. Há outras categorias de sons na fala (veja, e.g., Stevens, 1998; Kent & Read, 1992), mas o restante deste texto aborda apenas a produção das vogais orais e sua utilização na interpretação acústica de alguns fenômenos da voz cantada.

O painel superior da Fig. 1 destaca as características anatômicas mais relevantes na acústica das vogais. Sucintamente, há, durante a expiração, uma interação entre o ar proveniente da traquéia (T) e as pregas vocais, que vibram. Esta vibração é a *fonte* sonora que injeta pulsos de ar periodicamente na cavidade oral. Nas vogais orais, o trato nasal está acusticamente desacoplado devido à elevação do véu palatino (P) e a forma do trato vocal é determinada pela língua, lábios, mandíbula e posição vertical da laringe. As cavidades orais interagem sobre o som da vibração das pregas vocais, modificando-o de uma maneira específica para cada vogal. Por fim, o som resultante, filtrado pelo trato vocal, propaga-se dos lábios para o ambiente externo.

O processo descrito acima está esquematizado na parte inferior da Fig. 1, que apresenta o modelo Fonte-Filtro da produção de vogais (Fant, 1970). Este modelo separa os fenômenos acústicos em três partes supostamente independentes: a fonte sonora, o filtro acústico e a irradiação. A separação entre fonte e filtro é justificada porque a abertura (glote) por onde o ar flui entre as pregas vocais é muito menor que a seção transversal das cavidades supraglóticas.



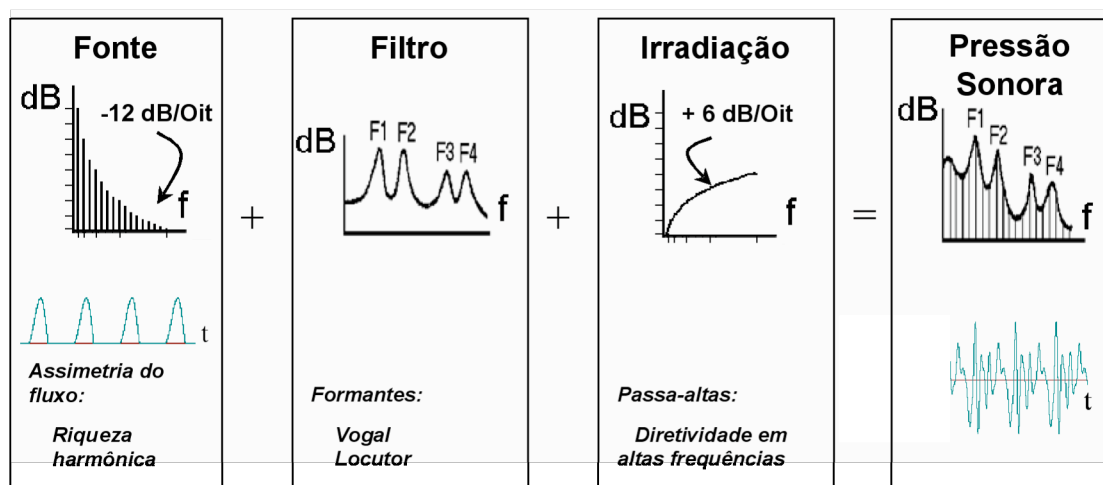
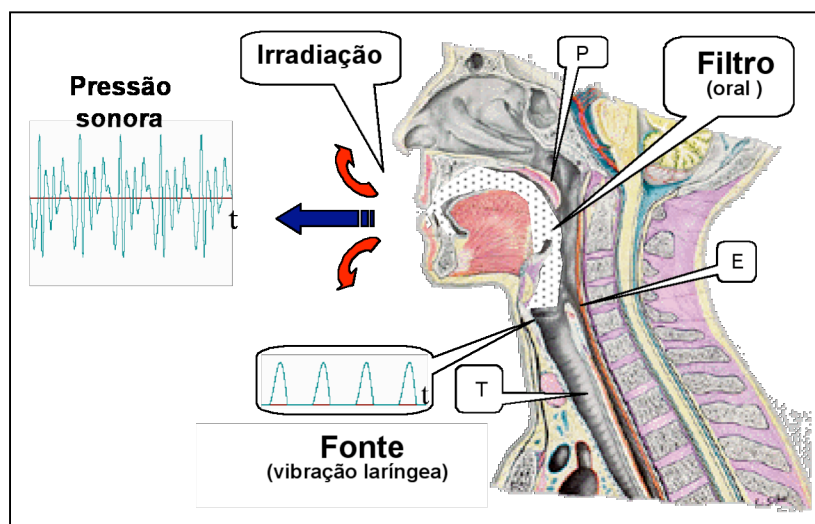


Figura 1: **Aparelho Fonador e o modelo Fonte-Filtro.** *Acima:* Estrutura anatômica do trato vocal. A elevação do pórtico velofaríngeo (P) desacopla as cavidades nasais. Note a proximidade da entrada do esôfago (E) com a região das pregas vocais, situadas acima da traquéia (T). Os pulsos gerados na fonação são filtrados pelas cavidades acústicas do trato vocal, e propagam-se pelo ar. Na irradiação, como sugere o desenho, parte do som (baixas frequências) espalha-se enquanto outra parte (altas frequências) propaga-se para frente. *Abaixo* (adaptado de Fant, 1970): modularização introduzida pelo modelo Fonte-Filtro (em alguns espectros há divisões em intervalos de 6 dB, no eixo vertical, e em oitavas, no horizontal). A fonte é representada por uma série harmônica, o filtro por formantes (F1, F2, etc.), e a irradiação pela sua característica passa-altas. Comparando-se o oscilograma do fluxo com o da pressão sonora vêm-se, de forma desordenada, as ondulações introduzidas pelos formantes, mas, no espectro da pressão irradiada, distingue-se cada um dos formantes.

O modelo Fonte-Filtro utiliza uma descrição dos fenômenos acústicos no domínio das frequências. O filtro oral é caracterizado por picos (F1, F2, F3 e F4, na Fig. 1) no espectro de frequências. Estes picos, que correspondem aos modos normais dos tubos acústicos, são tradicionalmente chamados de *formantes*. Os três primeiros formantes (F1, F2 e F3) têm menor dependência com o locutor e prestam-se, principalmente, para diferenciar as vogais. Os formantes superiores (F4, F5, etc.), por outro lado, têm menor conteúdo lingüístico e maior variação com o locutor. Acusticamente, os formantes amplificam seletivamente os harmônicos gerados pela vibração laringea.

Para compreender as características do espectro da *fonte* sonora é importante discutir a vibração das pregas vocais. Cada prega (Fig. 2) é uma dobra de tecidos que, mecanicamente, comporta-se como um *corpo* (músculo e ligamento) relativamente rígido e pesado, revestido por uma *cobertura* (tecido conjuntivo e epitelial) flexível (Hirano, 1981). O fluxo aéreo é modulado à medida que o espaço entre as pregas vocais é aberto e fechado ciclicamente, de acordo com a deformação da camada de cobertura (Fig. 3). A vibração glótica dá-se de forma aproximadamente periódica, mas a velocidade do fechamento de cada ciclo é maior que a velocidade de abertura. Assim, o fluxo é inclinado para a direita. Se os pulsos glóticos fossem perfeitamente senoidais, haveria apenas uma

componente harmônica e não haveria excitação de múltiplos formantes, não sendo possível a produção de vogais diferentes. Devido à *assimetria* do pulso, o espectro passa a possuir não apenas a componente fundamental,  $F_0$ , mas uma *série harmônica* (painel inferior, à esquerda, da Fig. 1) onde a frequência de cada termo é um múltiplo inteiro de  $F_0$ . Para a voz modal, esta que a quase totalidade das pessoas utiliza na conversação normal, a amplitude dos termos da série harmônica cai, de forma aproximada, a uma proporção de 12 dB por oitava, isto é, a amplitude do harmônico de ordem  $n$  é apenas 25% da amplitude do harmônico de ordem  $n/2$ . Ajustando-se a musculatura laríngea é possível gerar-se outras vozes (e.g., falsete, fry) com características acústicas e perceptivas marcadamente diferentes da voz modal (Fig. 4).

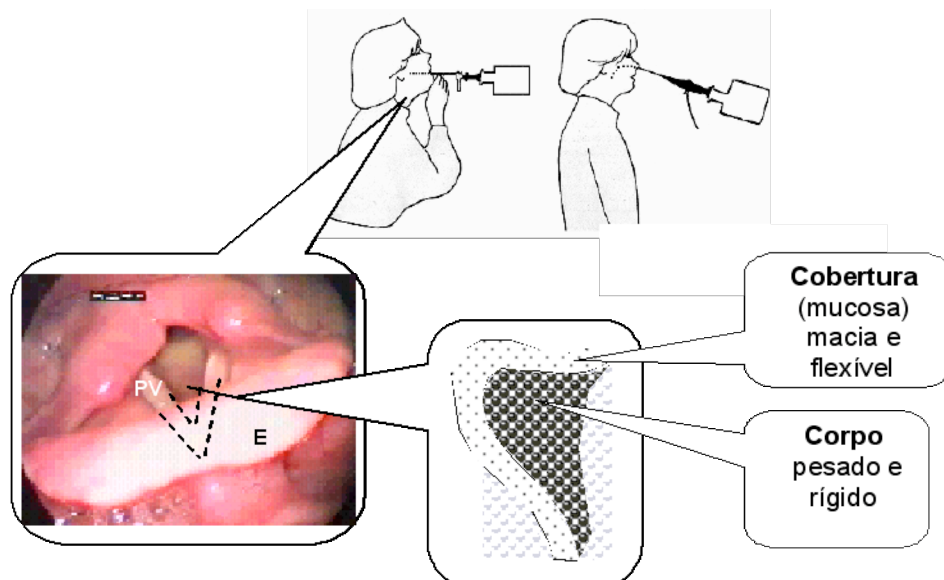


Figura 2: **Pregas vocais.** *Acima* (de Södersten & Lindestad, 1992): endoscopia oral (direita) e nasal (esquerda). *Abaixo*, à esquerda: visão endoscópica das pregas vocais (PV). As linhas tracejadas indicam a posição das pregas sob a epiglote (E). *Abaixo*, à direita: corte transversal de uma prega vocal, destacando as duas camadas mais relevantes para a fonação: o *corpo* e a *cobertura*.

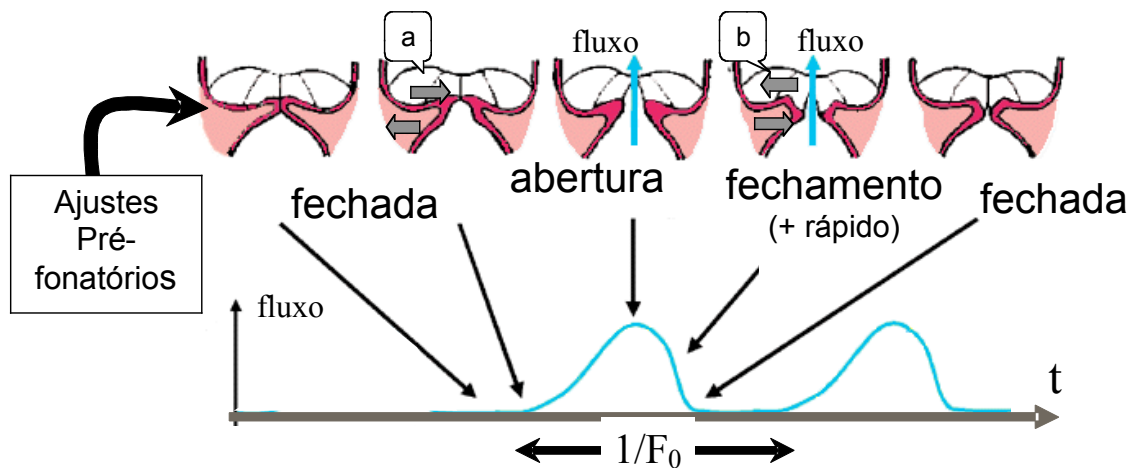


Figura 3: **Ciclo fonatório na voz modal** (adaptado de Hirano, 1981). A partir da esquerda: as pregas vocais estão inicialmente fechadas e, dependendo da frequência e intensidade do som a ser produzido, têm ajustes pré-fonatórios adequados de pressão subglótica, tensão longitudinal, aproximação da parte posterior das pregas vocais e força de compressão na parte medial. Com o esforço expiratório e com a glote ainda fechada, a pressão intraglótica aumenta enquanto as bordas inferiores afastam-se, acumulando energia potencial elástica na camada de cobertura. Com o aumento da pressão intraglótica, as bordas superiores finalmente separam e o ar flui pela glote. O fluxo de ar leva a uma queda na pressão intraglótica (Efeito Bernoulli) que ocorre num momento em que as bordas inferiores estão muito comprimidas. Isto resulta numa fase de fechamento mais rápida que a de abertura, causando uma assimetria na forma dos pulsos glóticos. O ciclo repete-se na frequência fundamental  $F_0$ . Os detalhes (a) e (b) mostram a oposição entre os sentidos dos movimentos das bordas superiores e inferiores. Esta diferença de fase está associada a uma onda (onda mucosa) que se propaga pela cobertura das pregas vocais desde sua parte inferior até sua parte dorsal. Doenças que dificultam ou interrompem o deslocamento deste movimento muco-ondulatório podem levar à rouquidão.

Com relação à irradiação, as baixas frequências tendem a espalhar-se por difração, enquanto as altas frequências propagam-se de forma mais direta. Em outras palavras, a pressão sonora numa região mais distante do locutor tende a ter uma maior intensidade relativa nas altas frequências. Pode-se dizer, assim, que a irradiação é equivalente a um filtro passa-altas. Este filtro pode ser representado, de forma simplificada (Fig. 1), por um ganho de 6 dB/oitava, isto é, a resposta dobra (+6 dB) cada vez que a frequência duplica (uma oitava). O estudo da irradiação sonora é relativamente complexo (e.g., Kinsler *et al.*, 1982; Fant, 1970) e a simplificação acima, que é adequada até cerca de 6 kHz, vem da analogia com um pistão (a massa de ar entre os lábios) vibrando à frente de uma esfera refletora (a face).

Tendo apresentado as várias facetas do modelo Fonte-Filtro para a produção de vogais, as discussões seguintes aplicarão estes conceitos a situações de interesse na voz cantada.

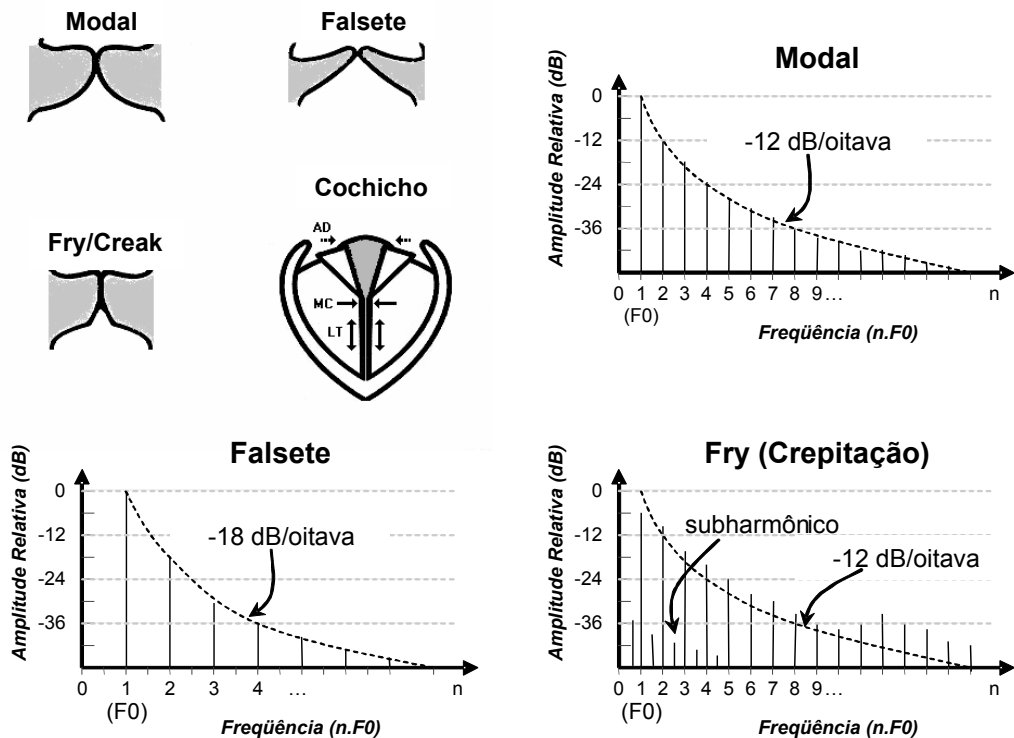


Figura 4: **Ajustes laríngeos e qualidade da voz.** *Acima, à esquerda* (baseado em Beck, 1988): formato da prega vocal em diversos ajustes laríngeos. Tomando-se a voz modal como referência e seguindo a descrição de Laver (1981), há, no falsete, grande aumento na tensão longitudinal (LT) e, conseqüentemente, em F0; uma fenda glótica é comum neste ajuste. No *fry* ou *creak* (denominado crepitação, pelos fonoaudiólogos, ou voz rangida, por alguns lingüistas), há grande redução na tensão longitudinal e na pressão subglótica, mas há aumento na compressão medial (MC), resultando num som mais grave, com aperiodicidade e subharmônicos. No *cochicho*, a falta de aproximação ou adução (AD) na parte posterior da glote resulta numa fenda onde é gerado um ruído de fricção; neste ajuste, não há vibração das pregas vocais. *Demais gráficos* (baseados em Klatt & Klatt, 1990): principais características acústicas de ajustes laríngeos, destacando as mudanças na frequência fundamental e na envoltória dos termos da série harmônica.

## 2. SINTONIA F1-F0 NO CANTO LÍRICO FEMININO

O canto lírico feminino requer sons bem mais agudos que os utilizados para a conversação. Enquanto o valor médio de F0 na fala feminina adulta está em torno de 220 Hz, as notas emitidas por uma soprano podem estar próximas a 1024 Hz (dó<sub>5</sub>). No canto, porém, à medida que a fundamental aumenta, aumenta também o espaçamento entre os termos da série harmônica gerada na laringe, diminuindo a concentração de harmônicos em torno dos formantes e perdendo-se os ganhos da ressonância com os formantes.

A Fig. 5 ilustra o problema. Hipoteticamente, uma soprano está emitindo uma nota em 500 Hz, mas o harmônico fundamental está entre o primeiro e o segundo formantes da vogal articulada ([u]). Desta forma, a amplitude do harmônico fundamental é relativamente pequena e a voz tem pouca audibilidade. A técnica utilizada para aumentar a amplitude do harmônico fundamental é ajustar o

primeiro formante (F1), fazendo-o coincidir com F0, através do abaixando da mandíbula, gesto que tem certa seletividade sobre F1 (Lindblom & Sundberg, 1971). Com isso, o harmônico fundamental aumenta pela ressonância com F1, resultando num ganho na audibilidade da voz sem que haja aumento na energia utilizada na fonação.

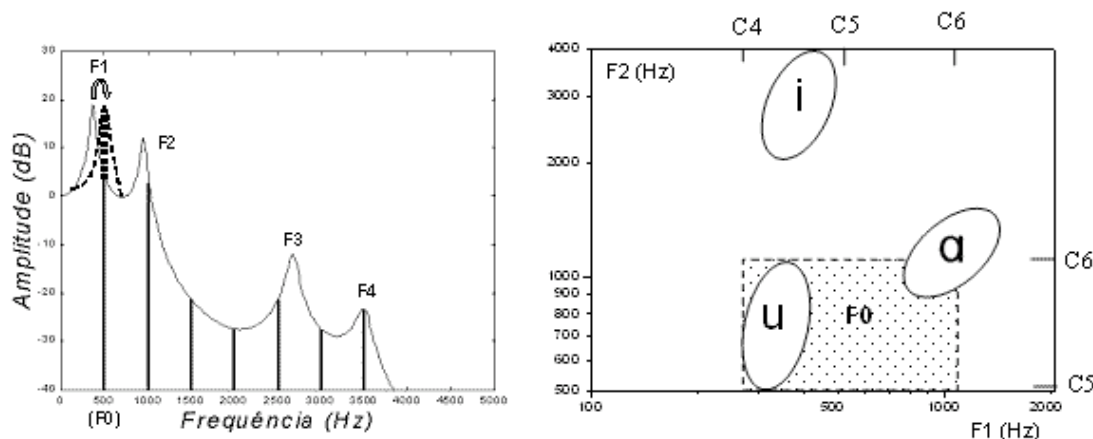


Figura 5: **Sintonia F1-F0.** *Esquerda:* aumento na amplitude do harmônico fundamental, F0, pelo deslocamento do primeiro formante, F1. *Direita* (adaptado de Rossing, 1990): representação de vogais no plano F1x F2; as elipses indicam valores médios de formantes e a área pontilhada é a região da frequência fundamental de sopranos:  $d\acute{o}_4$  (C4) a  $d\acute{o}_6$  (C6), aproximadamente). As demais vogais, não representadas, ocupam regiões intermediárias do plano, com superposições de áreas.

Como descrito por Fant (1986), outro benefício da sintonia F1-F0 é uma diminuição no consumo de ar devido a um grande aumento na pressão intraoral próximo ao instante de máxima abertura glótica. Este aumento de pressão supraglótica reduz o fluxo, mas não afeta a velocidade de fechamento.

O preço que se paga pela sintonia F1-F0 é uma perda na inteligibilidade das vogais. Segundo Di Carlo (1994), que estudou as vogais do Francês, somente as vogais nasais e as orais [e], [ɛ] e [o] são nitidamente individualizadas para notas emitidas entre o  $f\acute{a}_3$  e o  $l\acute{a}_3$  (350-440 Hz), que ela denomina *zona de tolerância*; entre o  $l\acute{a}_3$  e o  $mi_4$  (440-659 Hz), *zona de inteligibilidade eletiva*, somente [i] e [a] são diferenciados; acima do  $mi_4$ , *zona de não-inteligibilidade absoluta*, não se pode distinguir uma vogal das outras.

No canto lírico, não apenas de sopranos, outras distorções nos valores de formantes podem ocorrer. Os ajustes utilizados para alargar o trato vocal e diminuir a tensão da musculatura buco-facial não só alteram as ressonâncias como também limitam a amplitude dos gestos articulatórios, reduzindo as excursões temporais dos formantes, particularmente F1, que são elementos importantes da inteligibilidade (Di Carlo, 1994). Esta autora lembra ainda que consoantes mal articuladas pelo prolongamento excessivo das vogais também colaboram para a reduzir a inteligibilidade.

### 3. FORMANTE DO CANTOR CANTO LÍRICO MASCULINO

No canto lírico masculino as frequências mais agudas estão em torno do  $mi_3$  (330 Hz) para baixos,  $sol_3$  (392 Hz) para barítonos e  $d\acute{o}_4$  (523 Hz) para tenores, ao passo que o F0 médio na voz falada masculina é de 120 Hz. Assim, ao longo da tessitura dos cantores, há menor possibilidade de o harmônico fundamental localizar-se fora da região de ação do primeiro formante.

Os problemas no canto masculino surgem pelo ofuscamento da voz pelo som da orquestra. A técnica lírica vale-se, contudo, de ajustes há muito observados em cantores de ópera (e.g., Barhlomew, 1933), cujas vozes apresentam um pico espectral intenso e largo em torno de 3 kHz (Fig. 6). Este pico eleva a amplitude relativa dos harmônicos aí situados, destacando a voz sobre o som da orquestra. A produção deste pico, denominado *formante do cantor*, está relacionada com o abaixamento da laringe e o alargamento da cavidade faríngea, embora esta não seja o único mecanismo existente (Sundberg, 1979). Como descrito por este autor, o formante do cantor é uma aglutinação dos formantes superiores (F3, F4 e F5) devido às manobras citadas. No jargão dos cantores, esta técnica recebe nomes como *impostação* ou *projeção*.

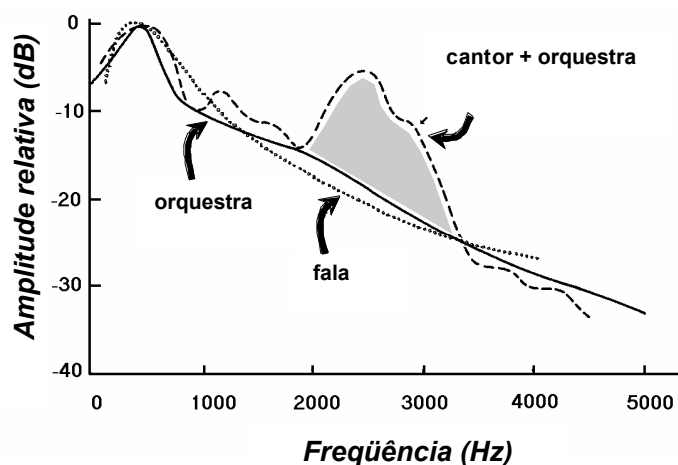


Figura 6: **Formante de cantor.** Espectros médios de longo prazo. Sem o recurso do formante do cantor (região escura), os sons da fala são mascarados pela orquestra. Com o abaixamento da laringe e o alargamento da região supraglótica, o formante do cantor é criado próximo a 3 kHz. Adaptado de Sundberg (1979).

Assim como na sintonia F1-F0 das sopranos, o formante do cantor propicia um aumento na audibilidade da voz sem aumento no esforço fonatório. Além disso, como lembra Sundberg (1979), há outras conseqüências favoráveis. Primeiro, a região de 3 kHz também coincide com a região mais sensível da percepção auditiva humana (onde ocorre uma ressonância com a cavidade do meato acústico do ouvido), sendo amplificada ainda mais pelo processamento auditivo periférico. Segundo, tendo-se em mente o comportamento passa-altas da irradiação sonora, os harmônicos de alta frequência propagam-se mais eficientemente em linha reta, o que pode auxiliar a platéia a discriminar melhor a voz do cantor no palco.

#### 4. CANTO HARMÔNICO

O recurso de destacar harmônicos é utilizado com maestria numa técnica de canto de regiões asiáticas, incluindo a Mongólia, o Tibet e a Sibéria (Levin & Edgerton, 1999). Chamada de “canto harmônico” (*harmonic chant/singing*), este estilo possui outras denominações que fazem alusão a sobretons (*overtone singing*) ou à garganta (*throat singing*). A primeira sensação que se tem ao ouvir esta manifestação artística é de certo espanto, por tratar-se de algo exótico, e vários ouvintes costumam admitir tratar-se de um som produzido por uma única pessoa.

Neste estilo (Fig. 7), o cantor emite um som laríngeo com uma frequência fundamental baixa (70-100 Hz) que permanece praticamente constante. Porém, refinando os ajustes utilizados na produção de vogais, ele consegue criar uma pequena cavidade intraoral que atua como um “superformante” de elevada amplitude e largura de faixa tão pequena que é capaz de destacar um único harmônico do espectro laríngeo. O cantor altera com precisão a forma da cavidade, mudando a frequência do formante e, literalmente, pinça harmônicos no espectro, criando uma seqüência melódica aguda que evolui sobre uma base grave. Detalhes sobre alguns ajustes articulatórios, arquivos de vídeo e áudio são disponíveis nos suplementos de Levin & Edgerton (1999).

A Fig. 7 mostra um exemplo de canto harmônico da região de Tuva, na Sibéria. No espectrograma de banda estreita, as linhas horizontais paralelas representam a evolução temporal da série harmônica; quanto mais escura a linha, mais intenso o harmônico. No início do espectrograma, o cantor utiliza uma voz sem os recursos do canto harmônico, como mostra a seção espectral “A”, onde vários formantes “convencionais” podem ser vistos. Assim que a técnica do canto harmônico é introduzida, um harmônico de alta frequência (seta) passa a destacar-se no espectro. Os harmônicos utilizados estão entre o 6<sup>o</sup> e o 12<sup>o</sup>, mas, como a sintaxe musical da região favorece melodias pentatônicas, o 7<sup>o</sup> e 11<sup>o</sup> harmônicos são evitados (Levin & Edgerton, 1999).

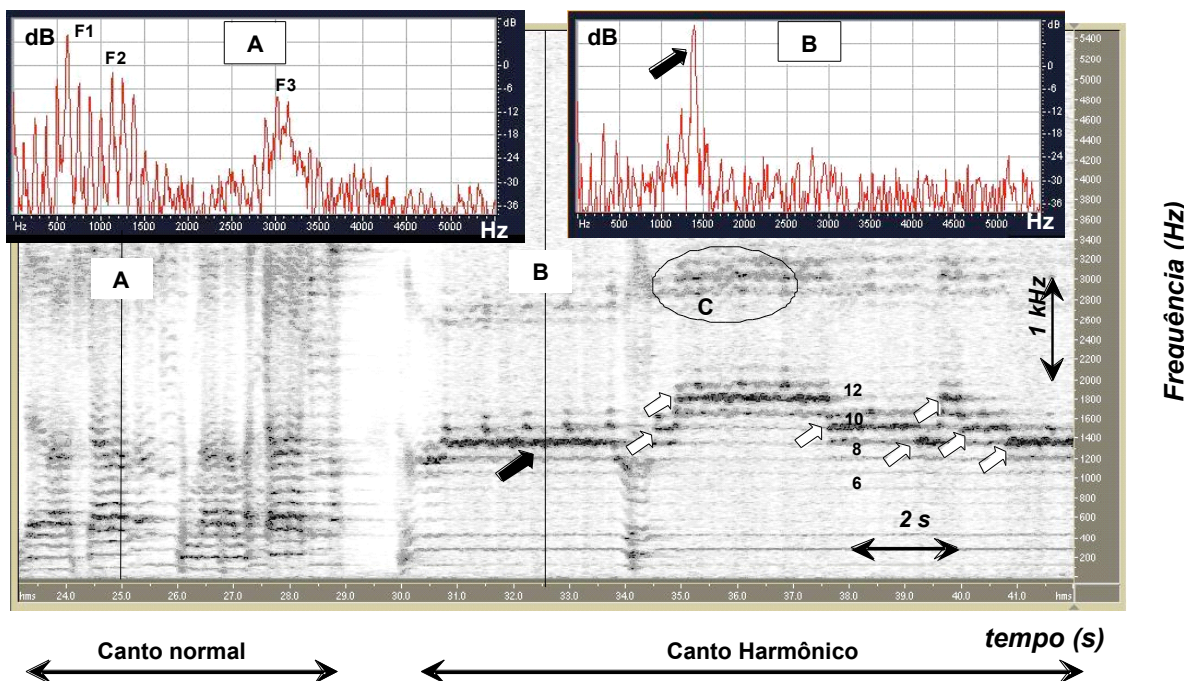


Figura 7: **Canto harmônico**. Na parte inicial, a técnica do canto harmônico não é utilizada. A seção espectral “A” mostra os formantes característicos da fala. Com o uso do canto harmônico, um harmônico (setas) destaca-se, como visto ao longo do espectrograma e na seção “B”. Os harmônicos selecionáveis estão entre o 6<sup>o</sup> e o 12<sup>o</sup>, mas o 7<sup>o</sup> e o 11<sup>o</sup> não são utilizados devido às escalas pentatônicas. O detalhe “C” indica uma ocorrência de vibrato. Elaborado com gravações de Levin & Edgerton (1999).

Este estilo também utiliza recursos fonatórios especiais e por isso é também denominada *khoomii*, palavra mongólica para “garganta”. Os ajustes laríngeos adotados têm semelhanças com o *fry* (Fig. 4). Com isso, além do baixo valor de F0, consegue-se uma maior velocidade de fechamento (que amplifica os harmônicos superiores) e uma diminuição da fase aberta de cada ciclo glótico (que diminui o consumo de ar e evita perda de energia pelo acoplamento com o trato vocal subglótico); as falsas pregas também podem ser utilizadas vibrando numa frequência sub-múltipla de F0 (Levin & Edgerton, 1999).

No espectrograma da Fig. 7 vê-se, no detalhe “C”, que as linhas horizontais não são retas, mas ondulam ao longo do tempo. Estas ondulações são conseqüências do vibrato, que será discutido a seguir.

## 5. VIBRATO VOCAL

O vibrato é uma variação regular na frequência de uma nota comumente utilizado na música (Fig. 8). Perceptivamente, sua qualidade depende de três parâmetros mensuráveis: a taxa, a profundidade e a regularidade. A taxa ( $F = 1/T$ ) é o número de ciclos por segundo; a profundidade, amplitude ou extensão ( $\pm\Delta F_0$ ), é o desvio da frequência em torno de seu valor médio, enquanto a regularidade carece de um parâmetro para medição, mas, desejavelmente, deve ter um aspecto senoidal. No *bel canto*, a taxa aceitável do vibrato varia de 5,5 Hz a 7,5 Hz e a profundidade vai de  $\pm 6\%$  a  $\pm 12\%$ , ou seja, de aproximadamente  $\pm 1$  a  $\pm 2$  semitons (Sundberg, 1987).

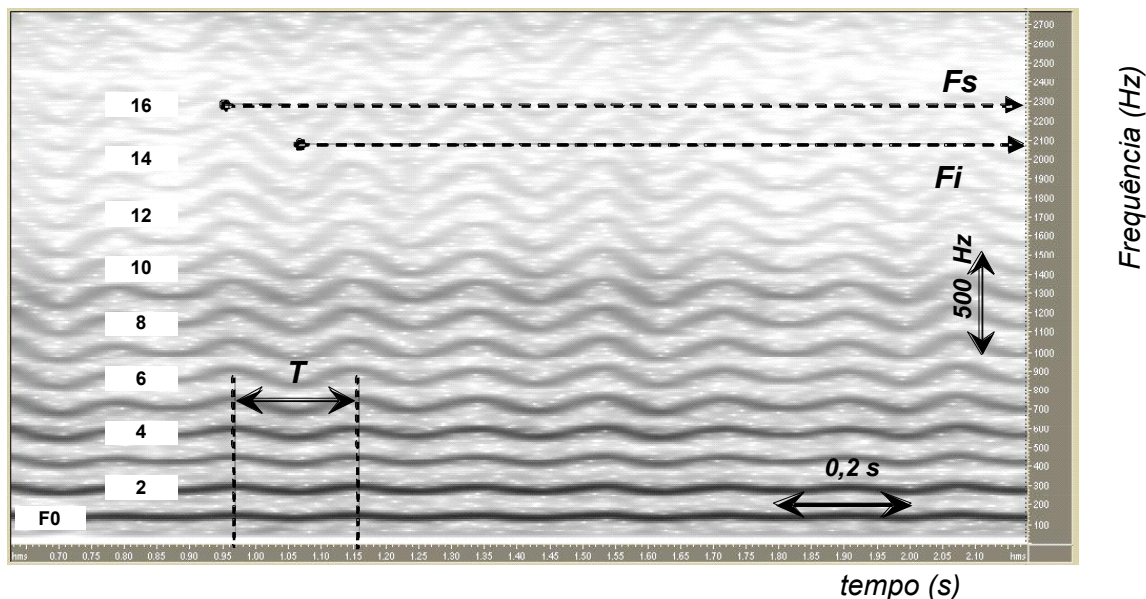


Figura 8: **Vibrato**. Espectrograma de banda estreita mostrando as ondulações introduzidas em toda a série harmônica devido ao vibrato. Os números crescentes à esquerda da figura (2, 4, 6, ...) são a ordem do harmônico. O período do vibrato é  $T \approx 0,19$  s e a taxa é  $F = 1/0,19$  s = 5,3 Hz. O 15<sup>o</sup> é utilizado para medir a amplitude do vibrato: sua frequência inferior é  $F_i = 2080$  Hz e a superior é  $F_s = 2280$  Hz. O valor médio de  $F_0$  é  $1/2 (2280 + 2080)/15 = 145,3$  Hz e a amplitude do vibrato é  $1/2 (2280 - 2080)/15 = \pm 6,67$  Hz, ou seja,  $\pm 4,6\%$  de  $F_0$ , que equivale a 0,8 semitons (vide texto principal).

A taxa e a profundidade do vibrato podem ser medidas em espectrogramas de banda estreita (Fig. 8) utilizando-se algum software que disponha de escalas e/ou cursores com resolução adequada. A leitura da duração do ciclo ( $T$ ) é imediata, mas, para estimar profundidade, é difícil obter-se resolução adequada medindo-se diretamente a frequência do harmônico fundamental. Porém, para um harmônico de ordem elevada, podem-se obter valores de frequência máxima e mínima com erros menores, e a profundidade do vibrato (valor de pico) pode ser expressa, em semitons, por:

$$\Delta F_0 = \pm 17,31 \times \ln \left( \frac{2F_s}{F_s + F_i} \right) \text{ [semitons]},$$

onde  $F_s$  e  $F_i$  são, respectivamente, os valores superior e inferior da frequência de um harmônico qualquer. No exemplo da Fig. 8,  $F_s \approx 2280$  Hz,  $F_i \approx 2080$ , donde  $\Delta F_0 \approx \pm 0,8$  semitons. Tendo-se em mente que o semitom da escala igualmente temperada equivale a uma relação entre frequências de  $\sqrt[12]{2} = 1,059... \approx 6\%$ , a amplitude do vibrato pode ser calculada sem o uso de logaritmos, obtendo-se  $\Delta F_0$  em valor percentual e obtendo-se a fração do semitom. No caso (vide legenda da Fig. 8),  $\Delta F_0 = 6,7/145,3 = 4,6\%$  e a amplitude do vibrato é  $\pm 4,6\%/6\% = \pm 0,8$  semitons.

No canto, o vibrato é produzido modulando-se a tensão da musculatura laríngea responsável pela tensão e enrijecimento das pregas vocais (músculos cricotireóideos e tiroaritenóideos, respectivamente); também é fisiologicamente possível produzir o vibrato variando-se a pressão subglótica (que resulta em maior deslocamento lateral das pregas vocais e, conseqüentemente, na elevação de sua tensão média), mas esta parece não ser a técnica natural de cantores experientes (Sundberg, 1979; Titze, 1994).

O vibrato produzido por variação da pressão pulmonar revela um mecanismo de interdependência entre a amplitude (causa) e a frequência (efeito). Por outros motivos, ocorre uma situação reversa no vibrato laríngeo, isto é, variações em  $F_0$  causam variações na amplitude da pressão sonora. Como ilustrado na Fig. 9, isto ocorre porque a amplitude dos harmônicos aumenta e diminui à medida que suas frequências oscilam em torno dos formantes, particularmente de  $F_1$ , que é o formante de maior amplitude (Sundberg, 1979).

A regularidade do vibrato é um aspecto que tem recebido atenção nos últimos anos (e.g., Diaz & Rothman, 2002). A regularidade pode ser analisada fazendo-se uma análise espectral da série temporal de valores de  $F_0$ , como ilustrado na Fig. 9. Este método pode ser adaptado para criar um espectrograma do vibrato e avaliar a dinâmica temporal dos ajustes.

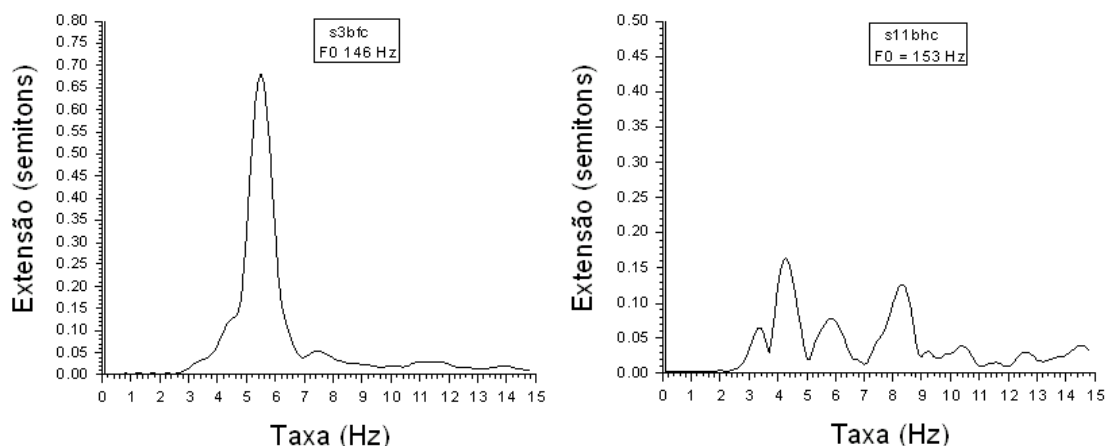


Figura 9: **Espectro da regularidade do vibrato.** *Esquerda:* voz com vibrato regular, taxa de aproximadamente 5,5 Hz e amplitude de 0,70 semitons. *Direita:* vibrato irregular e de baixa amplitude, apresentando dois picos maiores em 4,2 e 8,4 Hz. Os gráficos foram obtidos rastreando-se F0 a cada 20 ms, extraído-se a média da série temporal, passando por um filtro passa-altas com corte em 3 Hz e calculando-se a Transformada Discreta de Fourier em 100 pontos.

## 6. CONCLUSÃO

Este artigo abordou, de forma introdutória, o modelo Fonte-Filtro da produção da voz e sua utilização no estudo de alguns aspectos da voz cantada. A arte do canto tem estado à frente da ciência, mas aos poucos, a acústica vem explicando fenômenos que professores de canto conhecem há séculos. Com o avanço da tecnologia, o uso não só de registros acústicos, mas de sinais aerodinâmicos (fluxo aéreo e pressão sonora) e eletroglotográficos, tende a tornar-se um forte aliado à compreensão e evolução das técnicas de canto, como tem ocorrido na fonoaudiologia e na otorrinolaringologia (e.g., Hirano, 1981; Vieira, 1997; Vieira *et al.*, 2002). Estas especialidades médicas, aliás, têm tido crescente interesse no estudo da voz cantada visando o aprimoramento do tratamento de problemas vocais em cantores profissionais. Cabe aqui uma palavra de precaução. A facilidade atual de acesso a equipamentos de gravação e a *softwares* para a análise automática da voz (com resultados não-necessariamente confiáveis) não deve ocultar a necessidade de conhecimentos sobre os fenômenos básicos da acústica, as técnicas de gravação e os métodos de análise de sinais.

## 7. REFERÊNCIAS

- Bartholomew, W. T. (1933). A physical definition of "good voice-quality" in the male voice. *Journal of the Acoustical Society of America* 6, pp. 25-33.
- Beck, J. M. (1988). *Organic Variation and Voice Quality*. Ph.D. Thesis (University of Edinburgh).
- Diaz, J. A. & Rothman, H. B. (2002). Acoustical comparison between samples of good and poor vibrato in singers. *Journal of voice* 17, pp. 179-184.
- Di Carlo, N. S. (1994). L'intelligibilité de la voix chantée. *Medicine des Art* 10, pp. 2-15.
- Fant, G. (1970). *Acoustic Theory of Speech Production*. Mouton, The Hague.
- Fant, G. (1986). Glottal flow: models and interaction. *Journal of Phonetics* 14, pp. 393-399.
- Hirano, M. (1981). *Clinical Examination of Voice*. Springer-Verlag, New York.
- Kent, R. D. & Read, C. (1992). *The Acoustic Analysis of Speech*. Singular, San Diego.
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppers, A. B. & Sanders, J. V. (1982). *Fundamentals of Acoustics (Third Edition)*. John Wiley & Sons, New York.
- Klatt, D. H. & Klatt, L. C. (1990). Analysis, synthesis, and perception of voice quality variations among female and male talkers. *Journal of the Acoustical Society of America* 87, pp. 820-857.
- Laver, J. (1981). *The Phonetic Description of Voice Quality*. Cambridge University Press.
- Levin, T. C & Edgerton, M. E. (1999). The throat singers of Tuva. *Scientific American* 281(3), pp. 80-82 + s.
- Lindblom, B. E. F. & Sundberg, J. E. F. (1971). Acoustical consequences of lip, tongue, jaw, and larynx movements. *Journal of the Acoustical Society of America* 50, pp. 1166-1179.
- Rossing, T. (1990). *The Science of Sound, 2<sup>nd</sup> Edition*. Addison Wesley.
- Södersten, M. & Lindestad, P. A. (1992). A comparison of vocal fold closure in rigid telescopic and flexible fiberoptic laryngostroboscopy. *Acta Otolaryngologica (Stockholm)* 112, pp. 144-150.
- Stevens, K. N. (1998). *Acoustic Phonetics*. The MIT Press, Cambridge.



- Sundberg, J. (1979). Perception of singing. *Speech Transmission Laboratory Quarterly Progress and Status Report 1* (Royal Institute of Technology, Stockholm) pp. 1-48.
- Sundberg, J. (1987). *The Science of the Singing Voice*. Dekalb, Illinois.
- Södersten, M. & Lindestad, P. A. (1992). A comparison of vocal fold closure in rigid telescopic and flexible fiberoptic laryngostroboscopy. *Acta Otolaryngologica (Stockholm)* 112, pp. 144-150.
- Titze, I. R. (1994). *Principles of Voice Production*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Vieira, M. N. (1997). *Automated Measures of Dysphonias and the Phonatory Effects of Asymmetries in the Posterior Larynx*, Ph.D Thesis, University of Edinburgh, UK.
- Vieira, M. N., McInnes, F. R., & Jack, M. (2002). On the influence of laryngeal pathologies on acoustic and electroglottographic jitter measures. *Journal of the Acoustical Society of America* 111, pp. 1045-1055.

# QUALIDADE SONORA DOS AMBIENTES E PRODUTOS

**Prof. Samir N. Y. Gerges , Márcio A. Gomes, e Fabiano Lima**  
Departamento de Engenharia Mecânica (EMC) / Laboratório de Ruído Industrial (LARI)  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)  
e-mail: samir@emc.ufsc.br

**RESUMO:** Neste trabalho serão apresentados uma revisão das grandezas psicoacústicas usadas para quantificar a percepção humana do som e exemplos de qualidade sonora de diferentes produtos, tais como carros usados, secadores de cabelo e acústica de um auditório. Alguns parâmetros acústicos foram determinados a partir da resposta impulsiva, com o auxílio da técnica de MLS e comparados àqueles obtidos, através de um programa comercial de Acústica de Raios. Os resultados são discutidos e conclusões são apresentadas.

## 1. INTRODUÇÃO

A sensação humana reflete a avaliação de percepção não somente do som pela audição mais também pela visão, olfato, gustação e tato. É possível usar dois tipos de avaliadores; um grupo de avaliadores treinados (por exemplo, testadores de vinho) e outro não treinado (ingênuo) como por exemplo o consumidor.

A tecnologia de QS é conhecida em outras áreas, tais como qualidade de creme de pele. Neste caso é feito levantamento de opinião do consumidor no mercado sobre a qualidade do creme, tais como; espalhamento, firmeza, aderência, absorvência, refrescância entre outras. Os produtos devem ter DESCRITORES ou ESPCIFICAÇÕES, que reflitam o máximo possível de sua qualidade.

Tradicionalmente a grandeza usada em acústica quantifica parâmetros como nível de pressão sonora, nível de potência sonora e nível de intensidade sonora. Estas grandezas caracterizam o ruído, porém falham em refletir a percepção humana. A percepção humana é quantificada através de parâmetros psicoacústicas tais como *Loudness (L)*, *Sharpness (S)*, *Roughness (R)*, *Fluctuation Strength (FS)*, *Pleasantness (P)*, *Annoyance (A)*, *Tonality (T)*, *Kurtosis (K)*, entre outros. O objetivo principal é quantificar a percepção do consumidor em relação ao som gerado por um produto, que chamamos Qualidade Sonora dos Produtos (QSP). O processo de medição e análise consiste de gravação do som através de dois microfones (gravação binaural), a reprodução deste som para um grupo de pessoas avaliadoras, edição do sinal gravado e o cálculo das métricas (L, S, R, FS, etc.). Este refinamento tem por objetivo atender às expectativas do consumidor e só foi possível com os avanços tecnológicos na área da instrumentação.

A seguir, uma breve definição dos dois parâmetros psicoacústicos utilizados neste estudo.

- **LOUDNESS (L):** É uma quantificação mais precisa da sensação acústica percebida, se comparada ao nível de pressão sonora. Leva em consideração a frequência e a pressão sonora, largura de banda do sinal, assim como o mascaramento espectral e temporal. A unidade para o *loudness* é o sone, de caráter linear em relação à sensação acústica.
- **SHARPNESS (S):** Indica o equilíbrio espectral entre baixas e altas frequências, ou seja, quanto maior o conteúdo de altas frequências, maior é o *sharpness*. A unidade é o acum.
- **FLUCTUATION STRENGTH (FS):** Mede o processo de modulação de som por outro som, usando uma frequência de modulação de 4 HZ.
- **ROUGHNESS (R):** Similar ao FS, mede modulação do som, porém a portadora fica em 70Hz, que reflete a aspereza do som.

## 2. PERCEPÇÃO SONORA

A qualidade sonora não só reflete a percepção auditiva, mas também o efeito do ambiente como a visão. O ouvinte tem percepção dupla de audição e visão, que são acoplados para fornecer a sua opinião e reação. A grandeza de *Annoyance (A)* ou incômodo é a combinação dos efeitos das várias grandezas L, S, R, .etc. especialmente para cada produto. Um número único para refletir a qualidade sonora deve ser uma combinação das grandezas L, S, R, .etc cada uma, com certo peso

dependendo de cada produto. A avaliação dos ouvintes para cada produto é influenciada pela cultura, expectativas, condições emocionais, condições de conforto térmico e condições locais.

### 3. EXEMPLOS DE QUALIDADE SONORA DOS PRODUTOS

Nesta sessão serão apresentados os resultados de Qualidade Sonora de diferentes produtos.

#### 3.1- Qualidade Sonora de Carro ao Longo de Quilometragem Rodada

AMOSTRAS – O levantamento foi realizado em nove veículos de mesma marca e modelo, com quilometragens entre 20 mil km e 238 mil km, todos pertencentes à frota de táxis de Florianópolis. Tais veículos foram produzidos entre os anos de 1997 e 2001, com motor de 1000 cm<sup>3</sup> de deslocamento volumétrico. Este não passou por nenhuma reformulação substancial em suas características técnicas ao longo desses anos.

Grupos de quilometragem – Os carros testados foram selecionados em três grupos de quilometragem, de acordo com a Tabela 1; portanto, foram avaliados três carros em cada grupo. O Grupo I representou qualitativamente carros novos, o Grupo II carros com quilometragem intermediária e o Grupo III, por sua vez, carros com quilometragem elevada.

	Grupo I	Grupo II	Grupo III
Veículo A (km)	20130	118250	165560
Veículo B (km)	25570	121520	176550
Veículo C (km)	41640	125900	237580
<b>Média do grupo (mil km)</b>	<b>29,1</b>	<b>121,9</b>	<b>193,2</b>

Tabela 1. Grupos de quilometragem

EQUIPAMENTO UTILIZADO – Todas as medições foram realizadas com o sistema móvel de análise de ruído *NoiseBook 4820*, fabricado pela *HEAD acoustics*, incluindo software e a unidade de gravação e reprodução *MHS II*. O sistema operou em um microcomputador portátil *Pentium III* de 800 MHz com 256 MB de memória RAM (Ver Figura 1.).

GRANDEZAS MEDIDAS – O sistema possibilitou a gravação do sinal no tempo, assim como a apresentação no domínio da frequência. Os parâmetros de interesse, calculados pelo software, foram: nível de pressão sonora global em dB e dB(A), Zwicker *loudness* e Zwicker *sharpness*, os dois últimos calculados segundo a ISO532. Como estes parâmetros são mostrados para o ouvido esquerdo e direito, arbitrou-se utilizar os resultados do ouvido esquerdo na análise.

CONDIÇÕES DE ENSAIO – Uma vez que o foco do trabalho está centrado na percepção sonora no interior do veículo, todas as medições foram realizadas na posição da cabeça do passageiro da frente e com os vidros das portas fechados. Manter os vidros fechados foi essencial para se evitar ruídos do vento incidindo diretamente sobre os microfones. Pelo mesmo motivo, a ventilação forçada permaneceu desligada e os direcionadores do fluxo de ar, na mesma posição (fechada). Para padronizar a posição de medição, o banco do passageiro foi posicionado sempre da mesma forma (todo recuado para trás e com encosto reclinado ao máximo na vertical). Os dois microfones foram instalados no próprio fone de ouvido (*Headset MHS II*) o qual foi portado pela mesma pessoa (1,76 m de altura, 68 kg) durante as medições.

Com o objetivo de diminuir o ruído de fundo, os ensaios foram realizados em uma rodovia estadual afastada do centro da cidade, em terreno plano e estrada reta, com poucas irregularidades no asfalto. A pressão dos pneus foi checada e calibrada em 26 lb, conforme recomendações do manual do veículo.

As medições descritas nas situações a seguir têm o objetivo de simular condições normais de utilização dos veículos e foram realizadas sempre no mesmo trecho da rodovia.



Figura 1. Esquema da cadeia de medição

- Situação 1 – Veículo testado em velocidade constante de 30 km/h, em segunda marcha. A baixa velocidade foi utilizada para diminuir o ruído aerodinâmico e o produzido pelos pneus.
- Situação 2 – Similar à Situação 1, porém em terceira marcha e a 50 km/h.
- Situação 3 – Também em velocidade constante, igual a 80 km/h e em quinta marcha. Esta situação era mais propensa a uma maior dispersão de resultados em função das diferenças entre os pneus dos carros e ao ruído aerodinâmico, porém necessária para representar a rotação em velocidades maiores.
- Situação 4 – Transmissão em neutro, veículo parado e mantido em marcha lenta (acelerador não pressionado). Esta medição foi intercalada entre as outras situações, com intuito de que o motor estivesse em sua temperatura normal de funcionamento e com rotação estabilizada. O ruído de fundo foi medido para assegurar que não influenciaria nos resultados. O objetivo desta foi medir o ruído induzido pelo motor e parte da transmissão, uma vez que, com o carro parado, não há influência da pista ou do ruído aerodinâmico.

Através de medições preliminares, determinou-se que um período de medição de 6 seg. produziria resultados satisfatórios. Desta forma, foram realizadas quatro repetições de 6 s por situação e por veículo, computando-se um desvio padrão em torno de 0,6 dB(A). É importante ressaltar que a estabilização da velocidade do veículo foi de responsabilidade do motorista do táxi através do velocímetro. Nenhum método foi utilizado para aferição desta velocidade.

Para cada veículo, foi registrado o desgaste e o modelo dos pneus, assim como estado de conservação do escapamento. Esses dados qualitativos serviram para analisar amostras fora do padrão. Além disso, os motoristas foram submetidos a uma entrevista técnica na qual foram levantadas informações a respeito do histórico de manutenção do veículo.

**AVALIAÇÃO SUBJETIVA ATRAVÉS DE JURADOS** – Os programas de Qualidade Sonora visam, aproximar o ruído de um produto às expectativas do consumidor. Sendo assim, não há como implantar corretamente tal programa sem ter consultado, em alguma fase, a opinião do consumidor.

Ao término da etapa das medições foram escolhidos três carros, um de cada grupo, para serem avaliados subjetivamente por um grupo de 36 pessoas. Foi selecionada apenas uma medição da Situação 2 para representar cada veículo. Esta situação foi escolhida por corresponder as condições intermediárias de velocidade e marcha.

Individualmente, os jurados ouviram aleatoriamente a gravação dos três carros através do fone de ouvido *MHS II*. A gravação do ruído dos automóveis foi reproduzida tantas vezes quanto necessária até que esses jurados pudessem hierarquizar os três carros segundo dois critérios independentes: “Qual o carro considerado por você o mais desconfortável?” e “Qual a gravação que representa, no seu entendimento, o carro com maior quilometragem?”. A avaliação ocorreu no interior de uma câmara de baixo ruído de fundo e às pessoas foi dito apenas se tratar de três carros de mesma marca e modelo, porém com diferente quilometragens.

## RESULTADOS

**RESULTADOS GERAIS** – Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 são apresentadas as medições realizadas, sendo NPS o nível de pressão sonora, N o *loudness* e S o *sharpness*.

Segunda marcha, 30 km/h

Carro	Quilometragem (km)	NPS (dB)	NPS (dB(A))	N (soneGD)	S (acum)
1	20130	88,5	66,9	21,1	1,18
2	25570	88,7	65,8	20,0	1,18
3	41640	90,4	65,5	19,5	1,16
4	118250	92,6	67,2	22,4	1,15
5	121520	88,9	66,0	20,7	1,22
6	125900	91,4	66,4	21,5	1,29
7	165560	92,3	64,4	18,5	1,12
8	176550	91,1	66,2	20,5	1,13
9	237580	93,1	67,3	21,8	1,16

Tabela 2. Parâmetros medidos nas condições da Situação 1

Terceira marcha, 50 km/h

Carro	Quilometragem (km)	NPS (dB)	NPS (dB(A))	N (soneGD)	S (acum)
1	20130	92,1	69,9	26,2	1,27
2	25570	92,2	68,3	23,6	1,22
3	41640	94,3	69,2	25,1	1,24
4	118250	96,1	70,3	28,0	1,27
5	121520	93,3	70,9	28,1	1,32
6	125900	95,1	69,2	26,3	1,39
7	165560	96,1	68,6	24,6	1,16
8	176550	93,4	68,5	24,0	1,25
9	237580	95,8	69,9	26,4	1,29

Tabela 3: Parâmetros medidos nas condições da Situação 2

Quinta marcha, 80 km/h

Carro	Quilometragem (km)	NPS (dB)	NPS (dB(A))	N (soneGD)	S (acum)
1	20130	94,0	73,0	32,6	1,40
2	25570	93,3	72,0	29,8	1,37
3	41640	97,2	72,9	33,4	1,45
4	118250	98,1	74,6	37,6	1,65
5	121520	93,9	73,3	32,6	1,52
6	125900	96,0	72,2	32,4	1,53
7	165560	97,3	71,5	30,1	1,37
8	176550	95,2	72,1	31,1	1,42
9	237580	99,1	73,5	35,6	1,50

Tabela 4: Parâmetros medidos nas condições da Situação 3

Marcha lenta

Carro	Quilometragem (km)	NPS (dB)	NPS (dB(A))	N (soneGD)	S (acum)
1	20130	78,7	52,2	8,0	1,26
2	25570	77,8	52,1	7,8	1,22
3	41640	81,6	53,5	8,6	1,21
4	118250	83,8	54,2	9,2	1,17
5	121520	83,0	56,4	10,0	1,12
6	125900	78,6	51,6	7,6	1,42
7	165560	88,0	51,6	8,0	1,20
8	176550	83,4	52,7	8,3	1,21
9	237580	90,8	54,8	9,6	1,13

Tabela 5: Parâmetros medidos nas condições da Situação 4

**NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (dB)** – Na Figura 2 é mostrado o NPS medido para cada carro, em função da quilometragem e em três diferentes situações. Além disso, para representar com maior clareza as situações, foram incluídos a respectiva reta de ajuste e o coeficiente de correlação. Nota-se um comportamento levemente crescente

O Grupo I representa a média dos carros testados com baixa quilometragem e assim respectivamente, de acordo com a Tabela 1. Um desvio padrão é mostrado para mais e para menos em relação à média de cada grupo e situação. O ensaio em segunda marcha (Situação 1) foi o que apresentou crescimento mais acentuado entre as situações com o veículo em movimento. A Situação 2 e 3 estão mais próximas entre si e distanciadas da Situação 1.

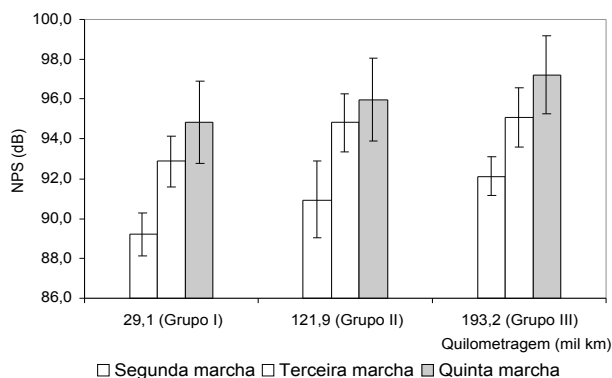


Figura 2: Nível de pressão sonora (dB) nas três situações de marcha, em função dos grupos de quilometragem

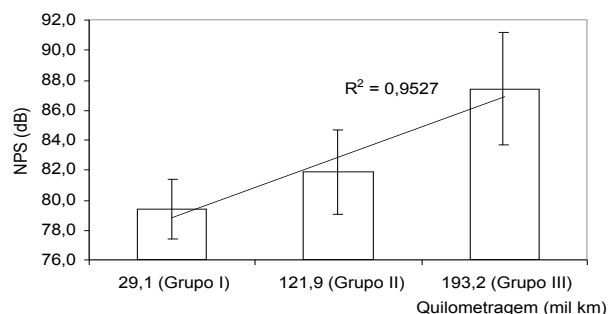


Figura 3: Nível de pressão sonora (dB) na situação de marcha lenta, em função dos grupos de quilometragem.

A tendência crescente do NPS ficou em maior destaque na Situação 4 (marcha lenta). Na Figura 3 são distribuídos os resultados do NPS apenas para a situação de marcha lenta, para os nove carros. A correlação entre os pontos e a melhor reta é de cerca de 70%. Na Figura 5 é mostrado o gráfico correspondente, tendo como eixo das abscissas os grupos de quilometragem.

**NÍVEL DE PRESSÃO SONORA (dB(A))** – A utilização da escala A de ponderação, para expressar o nível de pressão sonora, foi o primeiro passo no sentido de aproximar a quantificação do som à sensação acústica humana.

No gráfico da Figura 4, observa-se que o nível de pressão sonora em dB(A) aumentou levemente nos veículos do Grupo II em relação aos do Grupo I; no entanto, permaneceu praticamente igual aos valores originais no Grupo III.

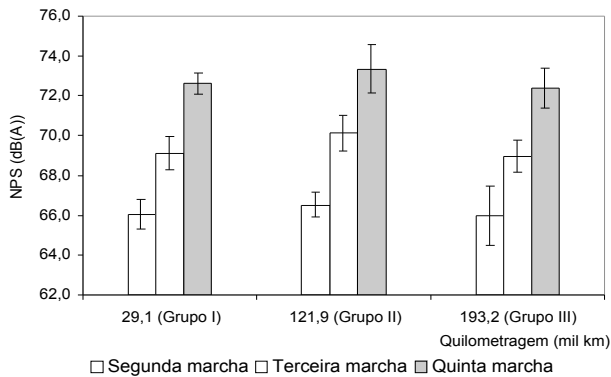


Figura 4: Nível de pressão sonora (dB(A)) nas três situações de marcha, em função dos grupos de quilometragem

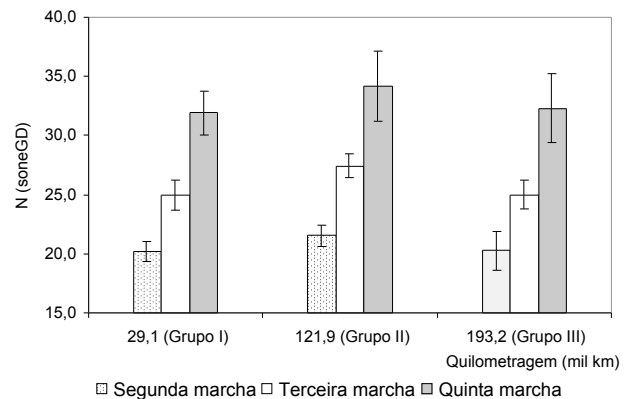


Figura 5: Loudness nas três situações de marcha, em função dos grupos de quilometragem

**LOUDNESS** – Os resultados do loudness demonstraram comportamento muito semelhante aos do nível de pressão sonora em dB(A), como mostrado na Figura 5.

**SHARPNESS** – Com o crescimento dos níveis de pressão sonora, medidos em dB, ao longo da quilometragem, seria de se esperar tendência contrária para o comportamento do sharpness. Isto porque os níveis em dB cresceram pelo aumento na emissão de fontes de ruído de baixa frequência (especialmente do motor). Na prática, isto só foi verificado na segunda marcha (Situação 1), quando analisadas as linhas de tendência mostradas na Figura 6. No entanto, deve-se observar que com o aumento da velocidade o ruído aerodinâmico passa a ter papel cada vez mais importante..

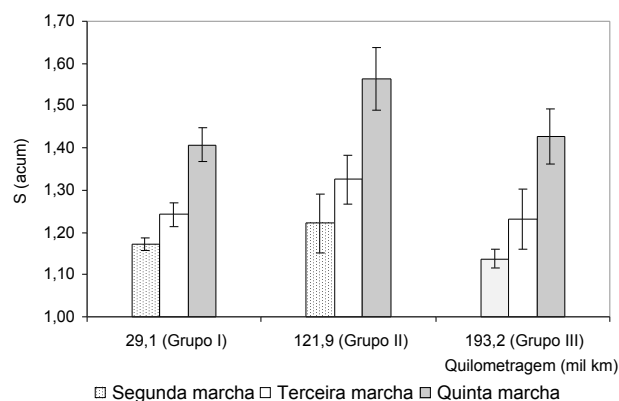


Figura 6. Sharpness nas três situações de marcha, em função dos grupos de quilometragem

**AVALIAÇÃO SUBJETIVA** – Dos três carros nomeados para a avaliação subjetiva, um possuía a menor e outro a maior quilometragem, de acordo com a Tabela 6. O terceiro carro foi escolhido dentre os outros do Grupo II, por apresentar muitos rangidos no painel e fixações, embora a parte de motor e transmissão apresentassem desgaste normal. Como foram selecionadas medições particulares de cada carro, os dados da Tabela 6 não correspondem aos da Tabela 3. Além disso, na Tabela 6 é computado o valor médio das duas orelhas, sendo utilizada média logarítmica para os valores em decibéis.

Segunda marcha, 30 km/h (média computando as duas orelhas)					
Carro	Quilometragem (km)	NPS (dB)	NPS (dB(A))	N (soneGD)	S (acum)
1	20130	92,8	72,3	29,6	1,30
6	125900	95,8	70,5	28,2	1,42
9	237580	97,3	71,3	28,5	1,27

Tabela 6: Medições particulares avaliadas pelo júri

Sob a diretriz do primeiro critério, “Qual o carro considerado por você o mais desconfortável?”, é mostrado o resultado da pesquisa na Figura 7.

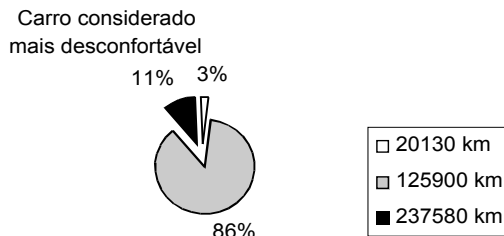


Figura 7: Pesquisa – Avaliação de desconforto

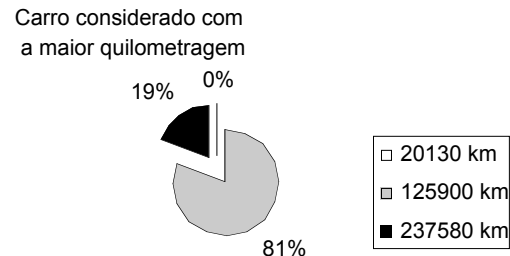


Figura 8: Pesquisa – Avaliação de quilometragem

Da mesma forma, na Figura 8 é explicitado o resultado sob o critério “Qual a gravação que representa, no seu entendimento, o carro com maior quilometragem?”.

Os dois critérios ordenaram os veículos exatamente sob a mesma classificação. O carro estimado como o de maior quilometragem (considerado o mais usado) foi o veículo que na verdade tinha quilometragem intermediária. Observando-se a Tabela 6 novamente, entende-se que o maior *sharpness* apresentado pelo veículo de número 6 explique esse resultado.

Para finalizar, analisando-se também o carro considerado como o de quilometragem intermediária, seria possível criar uma métrica que ponderasse as medições de *sharpness* e do nível de pressão sonora em dB para representar a opinião do consumidor sobre o que é um carro com alta quilometragem.

## CONCLUSÕES

Os ruídos gerados no interior do veículo, como rangidos e estalos, têm merecido atenção crescente por parte dos fabricantes de automóveis nos últimos anos. Isto ocorre, pois com o desenvolvimento de motores e transmissões mais silenciosos e suaves, outras fontes de ruído começaram a ganhar importância, dentre as quais o ruído do painel, de fixações e revestimentos. Estas fontes passam a ser ainda mais importantes a medida que a quilometragem do veículo avança, pois passam a ter uma influência maior sobre o conjunto.

Essa grande influência pôde ser comprovada com o resultado da pesquisa entre os jurados. Estes elegeram como o carro mais rodado e mais desconfortável o que tinha quilometragem intermediária, justamente por este apresentar vários ruídos do painel, de fixações e revestimentos. Os rangidos apresentados tiveram mais impacto que o ruído em baixa frequência, nitidamente superior no carro mais rodado. Desta forma, o *sharpness* se mostrou um bom parâmetro para estimar a percepção do consumidor em relação ao que representa um carro com alta quilometragem.

Mesmo tendo analisado um pequeno número de amostras, foi possível concluir com este estudo que o ruído tende a aumentar por volta dos 100 mil km, seja qual for o parâmetro que estiver sendo medido. Para carros com quilometragem acima dos 100 mil km, o quadro pode flutuar em função de outros fatores, como a integridade da manutenção ao longo da vida do automóvel. Além disso, no estudo aqui apresentado existem algumas prováveis fontes de erro, como o estado de conservação e marca dos pneus, assim como do escapamento. Outro ponto que provavelmente gerou algumas incertezas foi a estabilização da velocidade na qual foram feitas as medições, uma vez que nenhum tipo de cuidado foi tomado nesse sentido diante à dificuldade de tal e ao caráter investigativo do trabalho.

Mesmo considerando todos esses aspectos, definiu-se um comportamento de crescimento contínuo. Isto pode ser explicado pelo desgaste crescente do conjunto motor/transmissão, gerador de ruído em baixa frequência.

A divisão em grupos de quilometragem permitiu a redução do número de pontos a ser analisado e leva a uma caracterização qualitativa da quilometragem do automóvel: veículos com pouco uso, veículos em condições normais de uso e veículos entrando em fase de desgaste acentuado. Se o número de amostras fosse aumentado, esses grupos poderiam ser mais

representativos e servir como base para classificar o estado de conservação de um automóvel de mesma marca e modelo.

Os carros ensaiados não foram todos fabricados no mesmo ano, sendo que os carros de maior quilometragem geralmente coincidem com os carros de maior tempo de uso. Na Figura 9 é mostrada a distribuição do nível de pressão sonora dos nove carros, em dB, em função do ano de fabricação. Notar comportamento decrescente, significando que os carros mais novos apresentam menor ruído.

Por fim, outro ponto importante foi a deficiência do nível de pressão sonora, ponderado em escala A, em caracterizar o comportamento dos veículos ao longo de sua quilometragem.

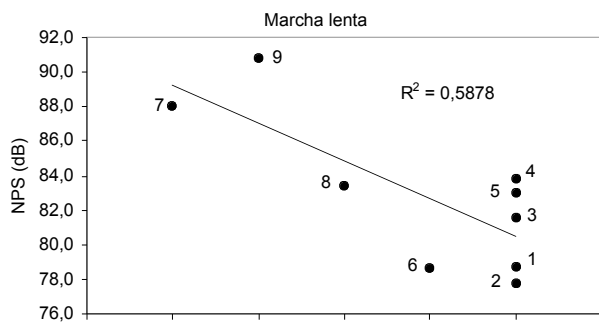


Figura 9: Nível de pressão sonora para a Situação 4 em função do ano de fabricação do veículo

## 3.2- Qualidade Sonora de Secadores de Cabelo

Secadores de cabelo são utensílios bastante difundidos, sendo usualmente classificados como ruidosos. Para auxiliar nesta quantificação foi introduzido o Selo Ruído. Este trabalho proporcionará uma comparação do ruído produzido por aparelhos de fabricantes diferentes, tanto do ponto de vista qualitativo como do quantitativo. A comparação será realizada entre três modelos de marcas diferentes, utilizando-se três amostras de cada produto.

São apresentados os resultados do ensaio de potência sonora, a medição do nível de pressão sonora em dB(A), e as métricas psicoacústicas loudness e sharpness. Estes dois últimos, relacionados à qualidade sonora, são utilizados para aproximar as medições à percepção humana. Na parte qualitativa é mostrada a avaliação subjetiva de um grupo de consumidores, com foco no desconforto causado pelo ruído dos secadores. Essa avaliação foi desenvolvida em duas etapas: na primeira não houve contato direto das pessoas com os aparelhos (estas ouviram gravação realizada através de sistema binaural); na segunda, os consumidores simularam o uso do produto propriamente dito. O objetivo primordial desta pesquisa é, além de realizar uma comparação global entre os diferentes modelos, confrontar a avaliação qualitativa com os parâmetros medidos, determinando se é possível caracterizar o ruído dos secadores testados com as métricas escolhidas. O resultado deste será apresentado em outro trabalho durante este mesmo congresso.

O secador de cabelo é um utensílio bastante difundido, sendo usualmente classificado como ruidoso. Por este motivo foi introduzido o *Selo Ruído*, uma forma de quantificar o ruído gerado por esse e outros dispositivos de uso no dia-a-dia. Neste trabalho comparou-se o ruído produzido por aparelhos de fabricantes diferentes, tanto do ponto de vista qualitativo como quantitativo. Foram utilizados três modelos de marcas diferentes e três amostras de cada produto. As medições incluíram o nível de pressão sonora (em dB e dB(A)), além dos parâmetros psicoacústicos *loudness* e *sharpness*. Estes dois últimos, relacionados à qualidade sonora, são utilizados para aproximar as medições à percepção humana. Na parte qualitativa é mostrada a avaliação subjetiva de um grupo de consumidores, com foco no desconforto causado pelo ruído dos secadores. Essa avaliação foi desenvolvida em duas etapas: na primeira não houve contato direto das pessoas com os aparelhos (estas ouviram uma gravação realizada através de sistema digital); na segunda, os consumidores simularam o uso do produto propriamente dito. O objetivo primordial desta pesquisa foi, além de realizar uma comparação global entre os diferentes modelos, confrontar a avaliação qualitativa com os parâmetros medidos.

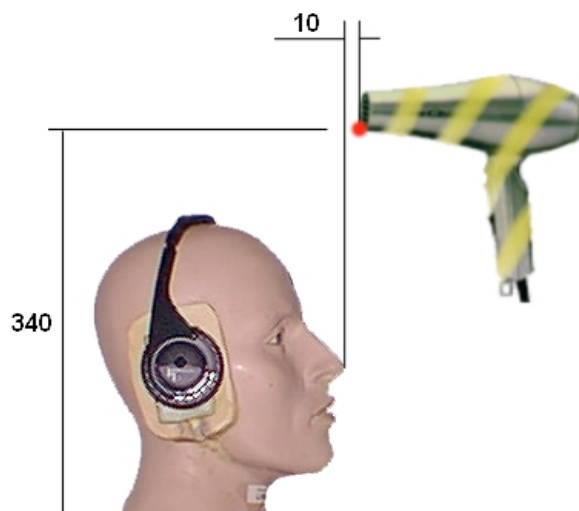


Figura 10: Posicionamento dos Secadores durante medições (mm).



### CONDIÇÕES DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados no centro da câmara semi-aneecóica do LVA. A cabeça artificial permaneceu 800 mm acima do chão da câmara. O secador foi fixado em tripé e mantido na horizontal, afastado 10 mm na horizontal em relação à extremidade da cabeça artificial e 340 mm em relação a sua base, como mostrado na Figura 10. O ponto destacado é a referência (parte inferior da extremidade do bocal do secador). O correto posicionamento foi feito com o auxílio de um gabarito com as dimensões indicadas.

Foram realizadas quatro gravações de 15 s por amostra, alternando entre os modelos de secador. O objetivo foi diluir os erros decorrentes do posicionamento dos secadores. Dessa forma, cada modelo totalizou doze medições (três amostras vezes quatro repetições).

### GRANDEZAS MEDIDAS

Os parâmetros de interesse, calculados pelo software, foram: nível de pressão sonora global em dB e dB(A), Zwicker *loudness* e Zwicker *sharpness*, os dois últimos segundo a ISO 532 B. Como estes parâmetros são mostrados para os canais esquerdo e direito, calculou-se a média entre os dois microfones.

### AVALIAÇÃO SUBJETIVA ATRAVÉS DE JURADOS

Os programas de Qualidade Sonora visam aproximar o ruído de um produto às expectativas do consumidor. Sendo assim, não há como implantar corretamente tal programa sem ter consultado, em alguma fase, a opinião do consumidor.

Ao término da etapa das medições foi selecionada uma amostra de cada modelo de secador (a que mais se aproximou da média das medições). As três amostras resultantes foram avaliadas subjetivamente por um grupo de dez pessoas – esta população constituiu-se integralmente por mulheres. O desenvolvimento se deu em duas etapas.

ETAPA I – Individualmente, os jurados ouviram aleatoriamente a gravação dos três secadores selecionados através do fone de ouvido *MHS II*. O ruído gravado foi reproduzido tantas vezes quanto necessário, até que esses jurados pudessem responder às seguintes perguntas:

1. Qual dos três secadores é o mais incômodo, em termos de ruído? Por quê?
2. Qual dos três secadores é o mais agradável, em termos de ruído? Por quê?
3. Qual dos três secadores tem o maior ruído?
4. Qual você compraria? Por quê?
5. Qual você *não* compraria? Por quê?

É importante ressaltar que até então as ouvintes não haviam tido nenhum contato com os secadores, com exceção da gravação, tampouco foram divulgados os fabricantes. As respostas foram arquivadas em um banco de dados em formato eletrônico.

ETAPA II – Nesta etapa da pesquisa praticamente repetiu-se as perguntas anteriores, diferindo apenas no enfoque das duas primeiras questões. Isto se deu depois de as pessoas terem manuseado os secadores, ligando os mesmos e simulando o uso.

6. Qual dos três secadores é o mais incômodo? Por quê?
7. Qual dos três secadores é o mais agradável? Por quê?
8. Qual dos três secadores tem o maior ruído?
9. Qual você compraria? Por quê?
10. Qual você *não* compraria? Por quê?

O bocal concentrador destacável, presente em todos os modelos, não foi utilizado pelas ouvintes durante os testes.

### RESULTADOS

Dos três modelos, dois corretamente apresentavam o Selo Ruído. O modelo A indicava 83 dB(A) de nível de potência sonora (com referência em 1 pW), exatamente o mesmo valor declarado no modelo B.

As medições realizadas nos secadores estão sumarizadas na Tabela 7. Nestes resultados os secadores foram testados sem o bocal concentrador.

Secador	NPS (dB)		NPS (dB(A))		N (soneGD)		S (acum)	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
A	78,4	0,7	78,5	0,8	42,5	2,0	5,45	0,14
B	82,0	1,1	82,3	1,2	49,3	2,3	5,57	0,16
C	80,7	0,6	81,1	0,7	48,6	1,8	5,36	0,23

Tabela 7: Parâmetros medidos para os secadores *sem* o bocal concentrador

Na Figura 11 é mostrado o espectro do ruído medido para o secador A sem o bocal concentrador, na Figura 12 para o secador B e na Figura 13 para o secador C.

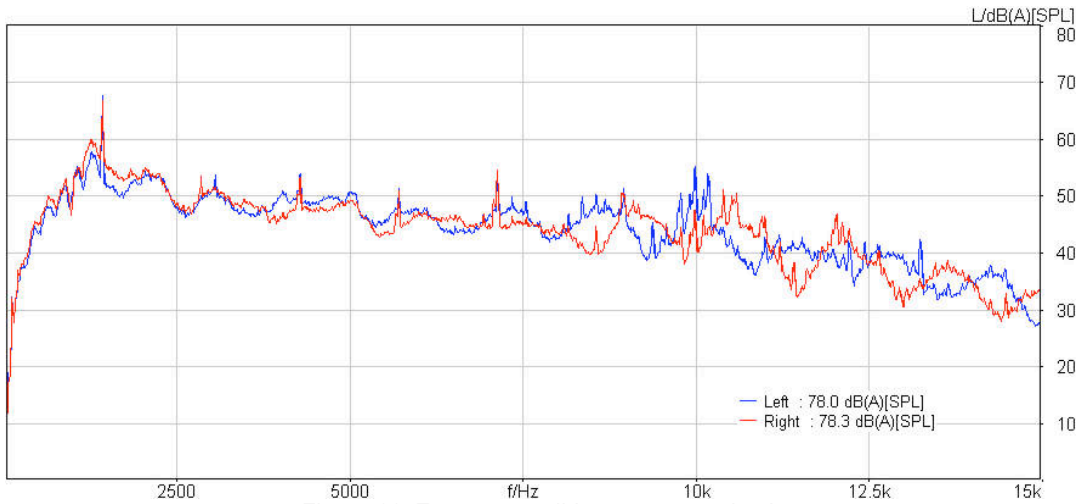


Figura 11: Espectro medido para o secador A

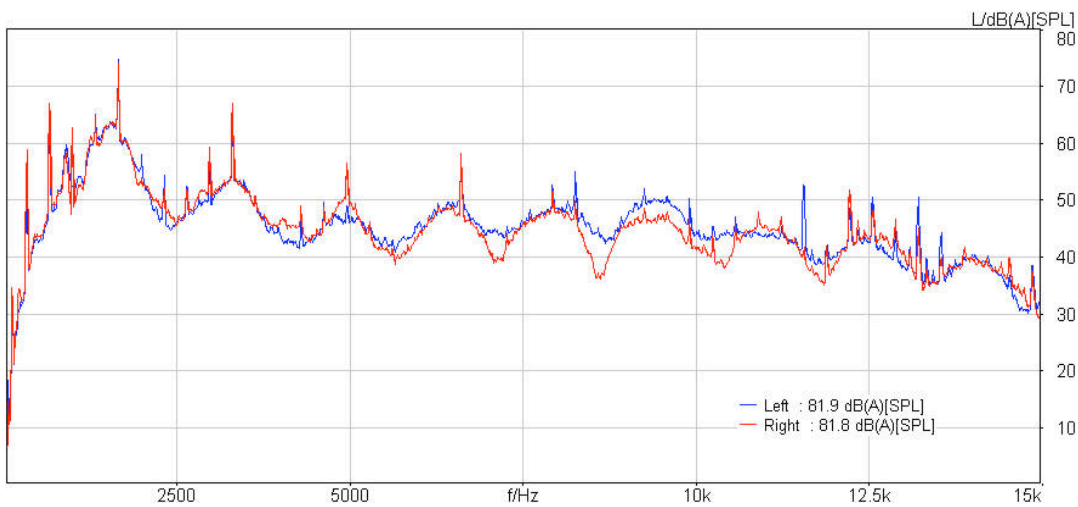


Figura 12: Espectro medido para o secador B

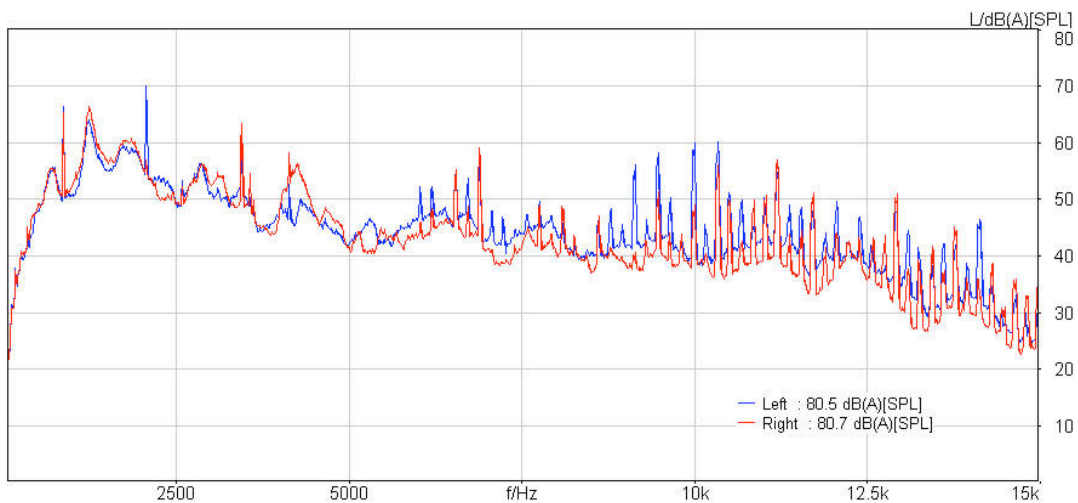


Figura 13: Espectro medido para o secador C

Repetiu-se os ensaios na câmara semi-aneecóica, porém desta vez utilizando o bocal concentrador na saída do fluxo de ar dos secadores (Tabela 8).

Secador	NPS (dB)		NPS (dB(A))		N (soneGD)		S (acum)	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
	A	78,3	0,8	78,4	0,9	43,2	2,0	5,03
B	81,2	1,4	81,5	1,5	47,8	3,6	5,22	0,19
C	79,2	0,6	79,3	0,7	46,1	1,6	5,14	0,20

Tabela 8 - Parâmetros medidos para os secadores com o bocal concentrador

O resultado da avaliação subjetiva (ETAPA I) pode ser visualizado na Figura 14. Cada gráfico corresponde a uma das cinco perguntas do questionário.

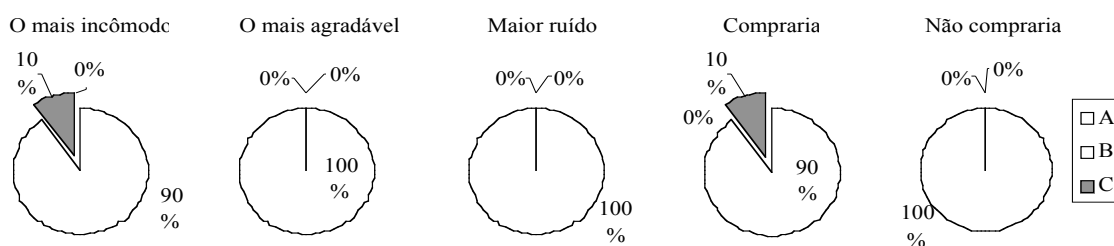


Figura 14 – Resposta dos jurados apenas ouvindo a gravação (ETAPA I)

Da mesma forma, apresenta-se o resultado da ETAPA II na Figura 15.

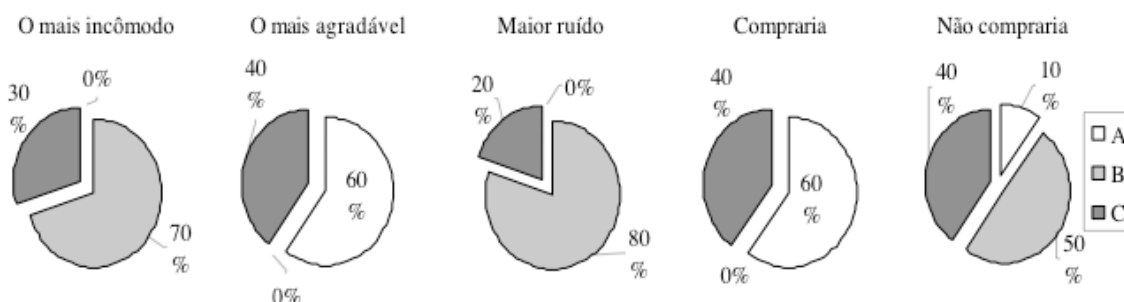


Figura 15 - Resultado dos jurados depois de manusear os secadores (ETAPA II)

## CONCLUSÕES

Através de levantamento realizado entre as ouvintes, concordou-se que o tempo médio para secar os cabelos é de aproximadamente 25 minutos, podendo aumentar consideravelmente em função do volume de cabelo. Sendo assim, o alto nível de ruído constatado (em torno de 80 dB(A)) pode ter efeitos negativos nos usuários, como estresse e dores de cabeça, entre outros. Dessa forma, é válida a introdução do Selo Ruído como incentivo aos aparelhos menos ruidosos.

Observando as Figuras 12,13 e 14 percebe-se que o modelo A apresentou o espectro mais plano e com nível global menor entre os três; o maior pico é de 63,0 dB(A) em 1427 Hz. O modelo B ressaltou tons de frequência mais definidos e com resposta harmônica pronunciada (maior pico de 71,4 dB(A) em 1651 Hz). Já no modelo C notou-se picos de até 60 dB(A) por volta de 10 kHz, característica ressaltada voluntariamente por duas pessoas durante a avaliação e considerada incômoda.

O bocal concentrador do fluxo de ar diminuiu generalizadamente os níveis de ruído em todos os secadores, como mostrado na Tabela . Por este motivo não fez parte da avaliação subjetiva, evitando comparações entre um modelo com o bocal em uso e outro sem o acessório.

No resultado da primeira etapa da avaliação subjetiva foi unânime a rejeição do secador C, já que 100% dos entrevistados responderam que não comprariam este secador (Figura 13). Este também foi considerado o mais incômodo e o mais ruidoso (em concordância com o maior valor de loudness medido, Tabela 7). Ruídos que causam incômodo são geralmente caracterizados por alto pitch strength e sharpness [3], o que, respectivamente, vem de acordo com o espectro mostrado na Figura 1 e com o maior valor medido para o sharpness na Tabela 7. Já o secador A foi identificado

como o mais agradável, sendo que as ouvintes justificaram a escolha pelo menor ruído produzido por este aparelho (novamente concordando com o menor valor medido para o loudness, Tabela 7).

Na segunda etapa da avaliação subjetiva o secador A ainda foi indicado como o mais agradável. O secador C foi lembrado no mesmo item por 40% das pessoas em função do design, segundo depoimentos. No entanto, o mesmo secador obteve desempenho pior nas perguntas 6, 8 e 10 em função do ruído elevado; mesmo assim, a aceitação frente à pergunta “Qual você compraria?” cresceu devido ao maior fluxo de ar gerado, possibilidades de regulagem e aparência.

### 3.3- QUALIDADE SONORA DE AMBIENTE

#### INTRODUÇÃO

A acústica de salas tem se mostrado, cada vez mais, como tema científico de grande potencial de desenvolvimento.

Atualmente, mesmo não existindo um consenso formal sobre quais parâmetros acústicos são mais importantes para a avaliação da qualidade acústica de uma sala, sabe-se que a maioria destes parâmetros pode ser obtida através de um processamento das respostas impulsivas do ambiente. Respostas impulsivas podem ser medidas diretamente com um microfone em uma determinada posição, produzindo um sinal sonoro que se aproxime de um pulso no domínio do tempo. Disparos de revólver são exemplos de sons que se aproximam do referido pulso. Entretanto, a maioria destes sinais nem sempre apresentam boa resposta em frequência, têm baixo grau de reprodutibilidade e ainda podem levar o sensor utilizado a trabalhar em uma faixa não linear, prejudicando a faixa dinâmica do resultado final, ou melhor, resultando em uma baixa relação sinal-ruído.

Várias alternativas a aquele tipo de sinal têm sido estudadas há vários anos. Um destes sinais, de uso reconhecido e razoavelmente popular entre os pesquisadores da área é aquele conhecido por Sequências de Comprimento Máximo (“Maximum-length Sequences”, MLS). A principal característica deste sinal é que sua função de auto-correlação é um pulso periódico. Assim sendo, pode-se demonstrar que, sob certas condições, a correlação cruzada entre o sinal de entrada (MLS) e a resposta da sala a este sinal é a resposta impulsiva. O MLS é um sinal pseudo-aleatório e, pelo fato de ser um sinal conhecido, produzido pelo próprio sistema de medição, não precisa ser medido, requerendo um canal de medição a menos do que o usual. Além disso, pelo mesmo motivo, o ruído não correlacionado ao sinal tende a ser rejeitado na operação de correlação cruzada, contribuindo para a alta relação sinal-ruído, característica ao sistema. Quando se começou a trabalhar com este tipo de sinal, uma das promissoras vantagens do uso do MLS era a possibilidade de realizar medições em ambientes, como salas de concerto ou de conferências, durante as atividades, sem causar incômodo aos interlocutores nem aos espectadores. No entanto, tem-se percebido que, nestas condições, as salas não se apresentam como sistemas invariantes com o tempo, o que infringe uma das condições necessárias para o uso do MLS. Certa controvérsia ainda existe em torno deste fato e o que tem sido prática mais comum para medir ambientes ocupados é usar o MLS durante períodos não muito longos, imediatamente antes dos eventos.

Das três frentes teóricas usadas em acústica de salas, duas podem ser úteis para o cálculo das respostas impulsivas, a saber, a teoria de ondas acústicas e a teoria da acústica de raios. A primeira, mais formal e mais rigorosa na descrição do fenômeno físico, ainda apresenta certas dificuldades para ser aplicada na prática, mas se constitui em uma área promissora para novas pesquisas. Mais recentemente, com o desenvolvimento dos recursos computacionais e de técnicas numéricas, esta teoria tem sido usada em baixas e médias frequências (Terai e Kawai, 1991). A acústica de raios ou acústica geométrica, de uma forma mais geral, sempre foi mais utilizada no auxílio de projetos acústicos de salas, seja através de modelos físicos em escala reduzida, ou através de modelos computacionais. A acústica geométrica assume que o som se comporta como raios de luz, refletindo nas superfícies de contorno do ambiente, sendo atenuado, dependendo do coeficiente de absorção da superfície.

Várias famílias de algoritmos podem ser usadas para se determinar, por exemplo, o ecograma em um ponto da sala, a partir do qual é possível ter uma aproximação da resposta impulsiva correspondente.

Neste trabalho é feita uma comparação entre resultados medidos em uma sala, usando o MLS como sinal de excitação, e aqueles obtidos de uma simulação feita através do programa comercial de acústica de raios “RAYNOISE”.

## Seqüências de Comprimento Máximo - MLS

O método mais difundido para obtenção de curvas de decaimento de uma sala, consiste na excitação desta com um sinal de espectro uniforme (como ruído branco ou rosa), na espera para que se atinja uma condição de estacionaridade no interior desta sala e no desligamento da fonte sonora e posterior registro da curva de decaimento da pressão sonora no tempo (Sampaio, 1998).

Este método possui muitas desvantagens, como por exemplo, curvas de decaimento com um certo caráter aleatório, o que dificulta a observação de detalhes, além da desconsideração de porções iniciais destas curvas, as quais são importantes para avaliação de impressões subjetivas. Uma forma de se diminuir este caráter aleatório, é fazer uma média entre curvas obtidas em diversas medições, o que torna este método muito dispendioso.

Assim, em 1965, Schroeder demonstrou que tal curva de decaimento pode ser obtida a partir da resposta impulsiva de uma sala, com uma única medição equivalente à média entre infinitas curvas, obtidas através do método anterior (Vorländer, 1996). Mas ressalta-se que para isto, é necessário que o sistema sob estudo seja linear e invariante no tempo, ou do inglês, *Linear and Time-Invariant* (LTI).

Hoje sabemos que a maioria dos parâmetros acústicos utilizados para avaliação da qualidade acústica de salas, podem ser obtidos a partir das respostas impulsivas destas últimas. Portanto, torna-se evidente o interesse no desenvolvimento de métodos que possam, facilmente, fornecer tais respostas impulsivas.

A seguir algumas definições serão apresentadas.

## Resposta Impulsiva de uma Sala

Quando uma fonte sonora é ligada no interior de uma sala, o som emitido começa a sofrer reflexões nos obstáculos que encontra pela frente. São nessas reflexões e na maneira como elas interagem com as superfícies e se distribuem pelo espaço, que consiste a principal preocupação da Acústica de Salas.

Uma forma de se avaliar o padrão de reflexões de uma sala é através de sua resposta impulsiva, na qual se lê um histórico da pressão sonora entre os pontos de excitação e de medição. O som emitido por uma fonte percorrerá vários caminhos até chegar ao ponto de medição. A resposta impulsiva fornece informação sobre a distância percorrida pelo som e a intensidade com que este chega a seu destino. Fazendo-se a leitura da resposta impulsiva para pares de pontos diferentes, espalhados pelo espaço, pode-se obter conclusões a respeito do campo sonoro e de sua adequação ao propósito de utilização da sala.

O sinal proveniente de uma fonte impulsiva, que chega a um microfone, ambos no mesmo recinto, pode ser dividido e classificado em três partes:

- Som Direto: corresponde ao primeiro sinal que chega ao microfone, antes de sofrer qualquer reflexão. Este sinal mantém as características com que foi emitido pela fonte;
- Primeiras Reflexões: corresponde à parte do sinal que é recebida em seguida pelo microfone. Estão relacionadas aos sinais que sofreram poucas reflexões;
- Som Reverberante: corresponde ao sinal captado pelo microfone, após algum tempo. Este sinal é uma composição dos sinais refletidos pelas diversas superfícies e que será amortecido, com o passar do tempo, devido às perdas de energia sofridas durante as sucessivas reflexões.

A Figura 16 ilustra a resposta impulsiva de uma câmara reverberante.

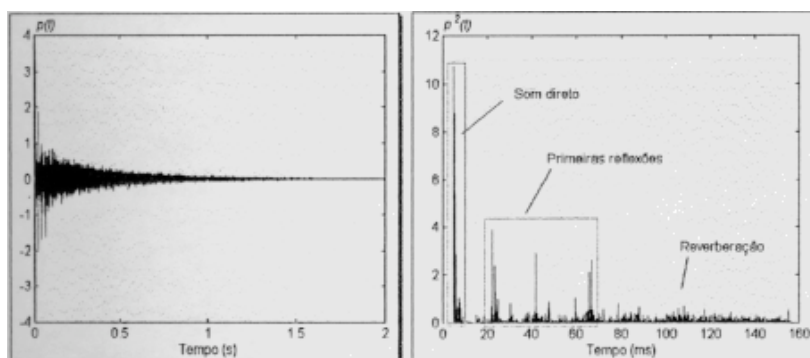


Figura 16: Exemplo de resposta impulsiva de uma sala e identificação de suas diversas partes.

## Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo

A linearidade de um sistema é um importante pressuposto para que se tenha aplicabilidade do Teorema de Fourier, ou seja, correspondência entre resposta impulsiva (transiente) e resposta em frequência (estacionária).

A invariância no tempo significa que as propriedades acústicas do sistema em estudo, permanecem inalteradas durante o processo de medição.

## MLS

MLS é um tipo especial de sinal de correlação, qualificado para o uso da técnica de obtenção de respostas impulsivas. As seqüências são formadas por sinais pseudo-aleatórios, binários e periódicos, com uma função de autocorrelação muito similar a um pulso de Dirac. Tais seqüências são geradas através de um *shift register*, com *loops* de realimentação.

Com  $m$  denotando a ordem do *shift register*, no máximo  $L = 2^m - 1$  combinações diferentes de “zeros” e “uns” são possíveis, pois o estado com zeros em todos os elementos é omitido. Introduzindo-se um *clock* no *shift register*, uma seqüência periódica de estados de registro é então gerada. A seqüência a ser usada como sinal, pode ser tomada a partir de qualquer ponto no registrador. O ponto crucial está no fato de que, com certos *loops* de realimentação, o período da seqüência repetida tem seu **máximo comprimento**,  $L = 2^m - 1$  e assim, o sinal resultante é uma **seqüência de comprimento máximo**.

A função de autocorrelação de uma MLS repetida periodicamente, é uma série de picos com amplitude  $L$  e *offset* negativo de valor  $-1$ , o qual é negligenciável. Ressalta-se que cada um desses picos contém a mesma energia que todo o período da MLS. A Figura 17 mostra um período de uma MLS de ordem 8 e sua autocorrelação.

Em resumo, um sistema LTI é excitado com uma seqüência periódica e estacionária. Tal período deve exceder a resposta impulsiva, por uma fração do tempo de reverberação. Assim que o sistema atingir um estado estacionário (o que é observado após um período), a seqüência de saída pode ser amostrada, com o mesmo *clock* do gerador de MLS. A frequência de amostragem deve obedecer ao critério de Nyquist, sendo duas vezes maior que a máxima frequência que se deseja estudar.

Portanto, tem-se:

$$\begin{aligned} [x_{mls}(t) * h(t)] * x_{mls}(-t) &= [x_{mls}(t) * x_{mls}(-t)] * h(t) = \\ &= \Phi_{xx}(t) * h(t) \approx \delta(t - i L \Delta t) * h(t) \end{aligned}$$

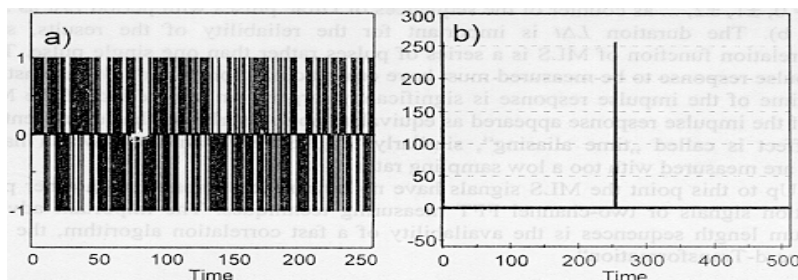


Figura 17: a) um período de MLS de ordem 8 e b) sua autocorrelação.

onde  $i = 0, \pm 1, \dots$  é um contador das seqüências de pulsos de Dirac, com período  $L \Delta t$  e “\*” indica convolução. Este período é importante para a garantia dos resultados, uma vez que a resposta impulsiva deve cessar antes que um período se complete, pois caso contrário, a “cauda” da resposta impulsiva pode se sobrepor ao período subsequente. Este efeito é conhecido como *time aliasing*.

## RAIOS ACÚSTICOS

Apesar dos avanços que vêm permitindo, cada vez mais, a aplicação da teoria de ondas acústicas no projeto de ambientes fechados, a teoria de raios acústicos ainda é a mais aplicada nestes casos. Atualmente, vários programas baseados nesta teoria estão comercialmente disponíveis.

A teoria de raios acústicos considera que o som se propaga em forma de um raio, com propriedades semelhantes às encontradas na ótica geométrica. A reflexão é o fenômeno mais

importante para esta teoria. Para se chegar a esta simplificação, considera-se que o comprimento de onda é infinitamente pequeno, comparado às dimensões da sala. Em geral, esta condição é verificada na prática, mas deve-se ficar atento ao fato de que, em baixas frequências, esta consideração pode não ser satisfeita. Uma frequência limite aceita por vários especialistas, acima da qual a teoria de raios acústicos é válida, é a frequência de Schroeder (Vorländer, 1998), dada por:

$$f_c = 2000\sqrt{T/V},$$

onde  $T$  é o tempo de reverberação em segundos e  $V$ , o volume da sala em metros cúbicos.

Como a resposta impulsiva de uma sala é, atualmente, essencial para a investigação da qualidade acústica, dois tipos básicos de algoritmos computacionais, baseados nos princípios da acústica geométrica, foram desenvolvidos para se chegar a uma resposta impulsiva aproximada. Um destes algoritmos é baseado na idéia de que cada reflexão pode ser imaginada como uma fonte virtual, existente fora da sala e constituída pela imagem especular da fonte (com relação à parede), cuja energia sonora, ao cruzar a fronteira, sofre uma perda correspondente ao coeficiente de absorção da sala (ver Figura 18). Este algoritmo é conhecido como Fonte Imagem Especular ("Image-Source"). O segundo algoritmo simplesmente "segue" o raio sonoro, levando em conta a lei da reflexão e é conhecido como Algoritmo de Raios Acústicos ("Ray-Tracing").

Cada um destes algoritmos apresenta vantagens e desvantagens e, dessa forma, outros algoritmos foram desenvolvidos, combinando estes dois primeiros (Vorländer, 1989). O algoritmo fonte imagem especular apresenta, como vantagem principal, a boa resolução temporal obtida, fato importante, principalmente quando se pretende realizar a convolução da resposta impulsiva com um sinal gravado (com uma certa frequência de amostragem), em processos de "auralização" (Kuttruff, 1993). Em compensação, o tempo de computação necessário para calcular respostas impulsivas cresce exponencialmente com o comprimento desta. Outra desvantagem é que este algoritmo não leva em conta os efeitos de difusão das reflexões, ou melhor, o espalhamento devido às formas irregulares das superfícies refletoras.

3124SRS<sup>1</sup>

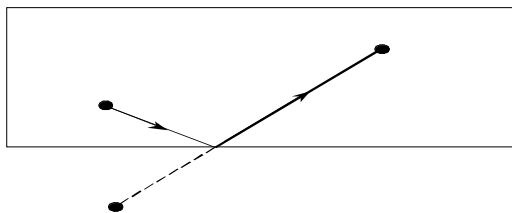


Figura 18: Sala com a fonte virtual especular substituindo uma reflexão de primeira ordem.

O algoritmo de raios acústicos, apesar de não oferecer um resultado com uma boa resolução temporal, pode levar em conta as reflexões difusas e ainda requer um tempo de computação que é (apenas) proporcional ao comprimento da resposta impulsiva.

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O sistema de medição utilizado é representado na Figura 4.1. A sala utilizada para as medições e simulações é representada na Figura 19. Para a simulação, alguns detalhes da sala foram simplificados. Além das poltronas, as superfícies internas da sala são compostas principalmente por concreto, lajota e cortina fina.

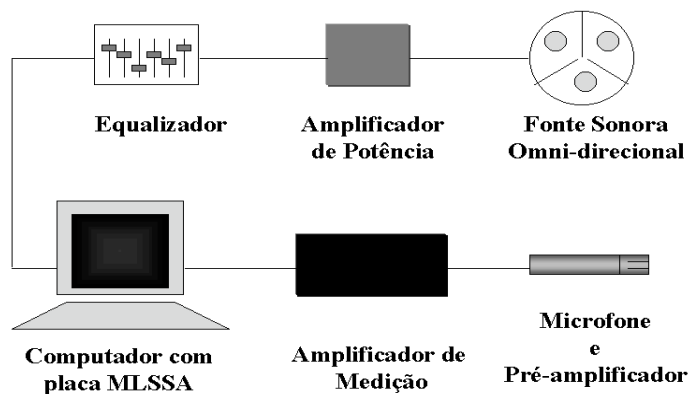


Figura 19: Representação do sistema de medição utilizado.

Para o melhor aproveitamento do sistema de medição e da técnica MLS, alguns cuidados devem ser tomados. Em primeiro lugar, como a resposta do alto-falante, em geral, não é plana, o sinal de excitação da sala deixa de ser uma MLS e, para minimizar este erro, uma certa compensação pode ser feita, equalizando-se o sinal que chega ao alto-falante. Esta equalização pode causar outros problemas, que podem prejudicar a faixa dinâmica da medição. Assim sendo, uma relação de compromisso deve ser alcançada. Para um melhor aproveitamento da faixa dinâmica, devem-se traçar certas curvas características do sistema de medição. Essas curvas permitem, basicamente, que se determine o nível do sinal enviado para o alto-falante, de acordo com o ruído de fundo existente no local onde é realizada a medição, ou seja, se um nível de sinal excessivamente alto for aplicado ao alto-falante, este pode vir a trabalhar em condições não lineares, introduzindo distorções às medições. Conseqüentemente, em ambientes muito silenciosos, pode ser mais conveniente diminuir, ao invés de aumentar, o nível do sinal. Se o ruído de fundo for maior, existem condições ótimas de operação, de forma que a faixa dinâmica da medição seja a maior possível. Em resumo, o sistema de medição é limitado, por um lado, pelo nível do ruído de fundo e, por outro, pela distorção do alto-falante (ou de outro elo mais frágil da cadeia de medição).

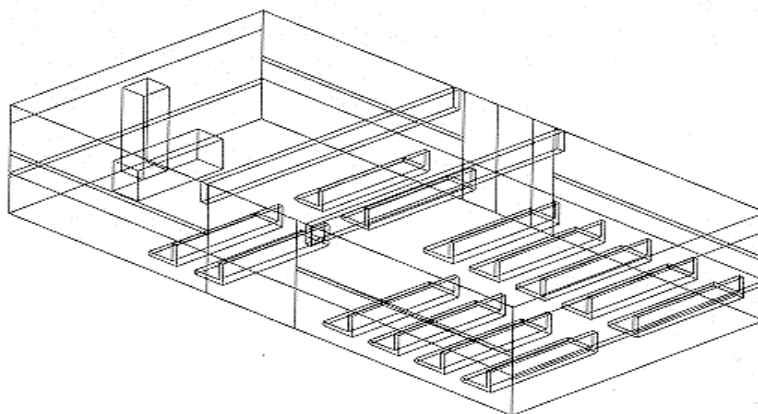


Figura 20. Representação da sala usada para realização das medições e das simulações.

O uso do programa de acústica de raios requer certos cuidados. Para cada ambiente simulado é necessário que se tenha absoluta certeza de que os parâmetros, tais como número de raios e ordem de reflexão, sejam bem escolhidos, isto é, não sejam subestimados de forma a afetar o resultado final. O método de cálculo escolhido foi o método híbrido conhecido como Método dos Feixes Cônicos ("Conical Beam Method"), e o número de raios utilizado foi de 50000, enquanto o número de reflexões foi de 60. Simulações foram feitas tanto considerando as reflexões especulares como reflexões difusas nas janelas da frente e do fundo da sala.

## RESULTADOS

Os resultados obtidos através do RAYNOISE, comparados às medições em uma dada posição do auditório (Figura 20) são mostrados nas Figuras 21 e 22, em função da frequência. Nestas figuras pode-se encontrar os resultados medidos e simulados, com e sem difusão, para uma dada posição



do microfone. As barras verticais na curva em azul indicam o desvio aceitável, em relação aos resultados experimentais, a fim de que a simulação possa ser considerada satisfatória, de acordo com Vorländer (Vorländer, 1995). Evidentemente, faz-se necessário levar em consideração as incertezas envolvidas no processo de medição, as quais tendem a aumentar com a diminuição da frequência. No entanto, a maior parte dos resultados dos parâmetros investigados pode ser considerada razoável, quando se consideram reflexões difusas.

Se os efeitos de difusão não são considerados, os resultados numéricos tendem a se afastar dos valores medidos experimentalmente. O resultado do EDT, em 1000 Hz, é quase o dobro do valor medido, nesta mesma frequência, quando a difusão não é incluída no modelo. Para o caso da reflexão especular, parece ser impossível obter uma boa concordância entre os valores medidos e calculados de EDT, apenas ajustando os coeficientes de absorção.

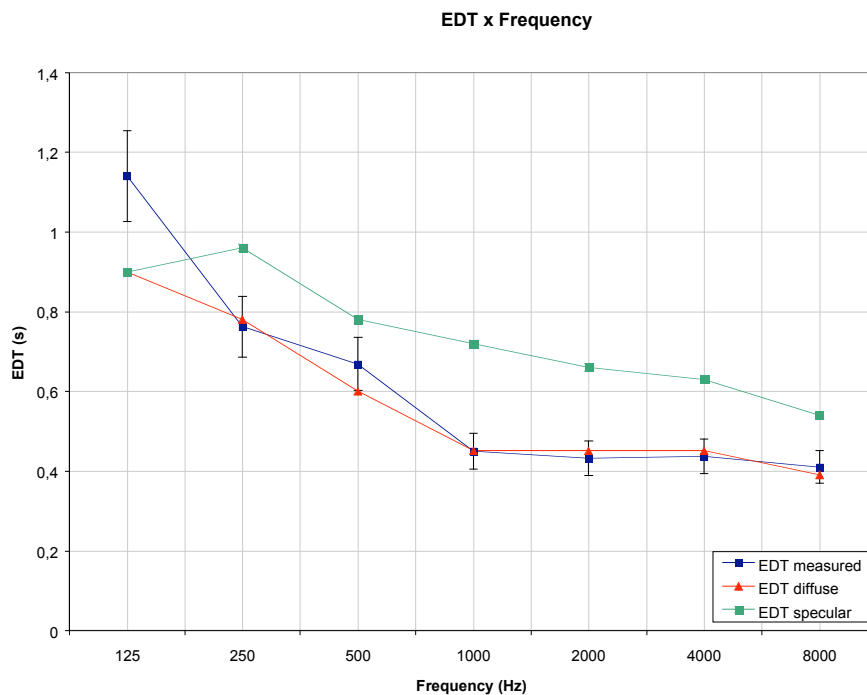


Figura 21: EDT calculada pelo RAYNOISE, com e sem difusão, obtidas em uma dada posição da sala, em função da frequência.

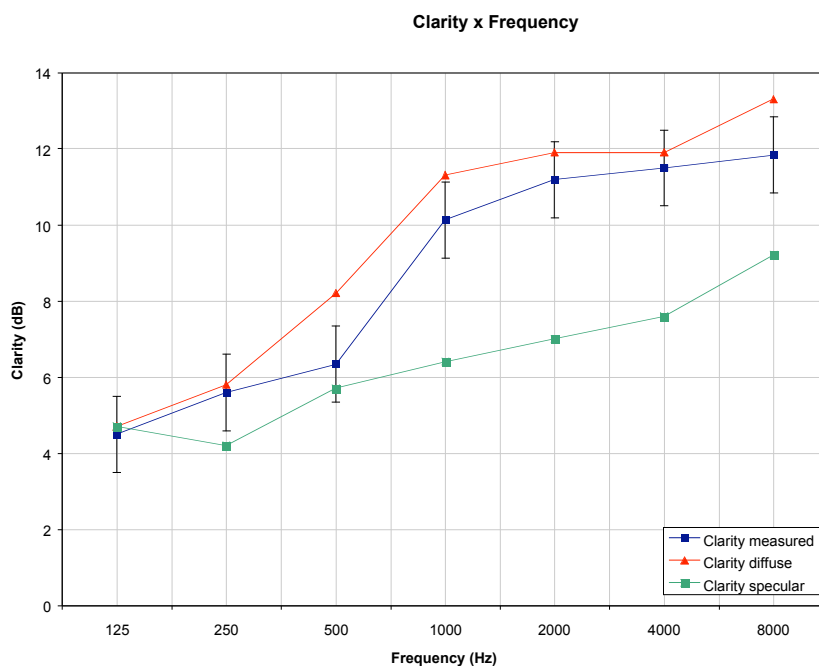


Figura 22: Fator de Clareza ("Clarity" calculada pelo RAYNOISE, com e sem difusão, obtidas em uma dada posição da sala, em função da frequência.

Os valores para o coeficiente de difusão utilizados nas simulações foram: 0 em 125 Hz, 0.02 em 250 Hz, 0.05 em 500 Hz e 0.1 acima de 1000 Hz (frequências centrais das bandas de 1/1 oitava), para todas as superfícies, com exceção dos assentos, onde valores de 0.2 foram considerados para as bandas de frequência central acima de 1000 Hz. Os resultados em outros locais da sala também foram investigados e são similares aos apresentados aqui.

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na simulação, para EDT e Fator de Clareza, são bem próximos àqueles medidos quando reflexões difusas são consideradas e as diferenças estão dentro dos limites máximos aceitáveis (10% para EDT e 1 dB para o Fator de Clareza, segundo Vorländer, 1995). Não houve dificuldades para se atribuir valores de coeficientes de absorção para as superfícies, mas o processo de atribuição de valores para os coeficientes de difusão veio a ser um procedimento de tentativa e erro. Algumas regras propostas por Vorländer (Vorländer, 1998) foram parcialmente obedecidas, mas dúvidas com relação à magnitude dos valores atribuídos a este coeficiente ainda permaneceram.

É importante mencionar que coeficientes de difusão foram atribuídos a todas as superfícies do modelo. Em simulações anteriores, quando difusão foi atribuída a apenas algumas superfícies, os resultados de EDT não se aproximaram, de forma alguma, aos resultados das medições.

As diferenças verificadas entre os resultados das simulações (feitas considerando reflexões difusas e reflexões não difusas) e das medições indicam a necessidade do desenvolvimento de técnicas de medição de coeficientes de difusão, assim como da fundação de uma base de dados para este coeficiente, característico de vários tipos de superfície.

Os resultados apresentados aqui são para apenas uma posição da fonte sonora e do sensor, mas os resultados obtidos em outras posições também foram analisados. As diferenças entre os resultados das simulações e das medições, para estas outras posições, são da mesma ordem daquelas apresentadas.

### OBSERVAÇÕES COMPLEMENTARES

Outros trabalhos, relacionados à qualidade acústica de ambientes, vêm sendo desenvolvidos no Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina, alguns em cooperação com instituições que podem se beneficiar diretamente dos resultados das pesquisas. Como ilustração cita-se o exemplo de um estudo feito com a sala principal do Centro Integrado de Cultura, em Florianópolis. As Figuras 23 e 24 mostram a fotografia e o modelo desta sala, construído no programa de raios acústicos RAYNOISE.



Figura 23: Fotografia do interior do Teatro do CIC.

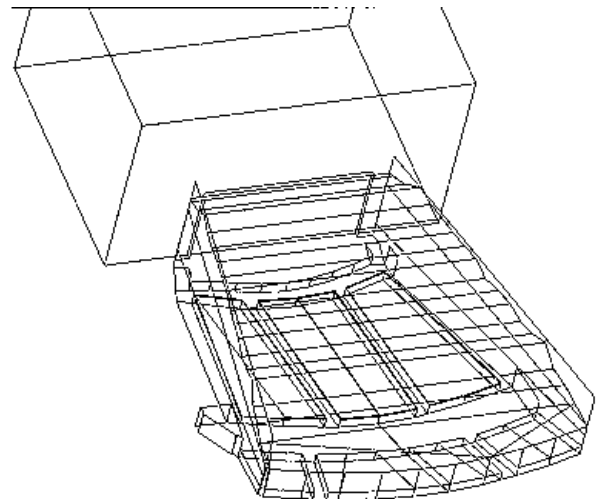


Figura 24: Modelo construído através do RAYNOISE, representando o Teatro do CIC.

### AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Brasil).

## REFERÊNCIAS

- [1] GERGES, S.N.Y. Ruído: Fundamentos e Controle. Editora NR, 2a. Edição, 2000.
- [2] MARROQUIN, M. Using Sound Quality in the Automotive Industry. B&K Instruments, Chicago, IL USA..
- [3] NEUTRIK-CORTEX INSTRUMENTS. Psicoacústica - Uma Ferramenta para Projetos Industriais de Áudio. Santo Ângelo Indústria e Comércio Ltda, Informativo técnico 001.
- [4] ONUSIC, H. A Evolução da Acústica Veicular no Brasil. Palestra apresentada no VI SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 2001.
- [5] ONUSIC, H. e HAGE, M.M. Available Parameter for Acoustic Qualification/Quantification. Palestra apresentada no V SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 1999.
- [6] MIRANDA, G., PERES, M.A.S., FOGAÇA, M.A., BERNARDINELLI, M.e L., A.Jr. Reavaliando as Métricas Psicoacústicas. Trabalho apresentado no VI SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 2001.
- [7] BAPTISTA, E.L., ONUSIC, H. e HAGE, M.M. Some Considerations Regarding Loudness Evolution. Trabalho apresentado no VI SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 2001.
- [8] NUNES, R.F. e MIRANDA, G. Medidas de Intesidade Sonora para Identificação das Fontes de Ruído de um Motor Ciclo Otto e Ruído Interno de Painei. Trabalho apresentado no V SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 1999.
- [9] MIRANDA, G., HAGE, M.M. e YAMASHITA, E.T. Sound Quality no Desenvolvimento de Novos Produtos. Trabalho apresentado no V SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 1999.
- [10] GERGES, S.N.Y., *Ruído: Fundamentos e Controle*, Editora NR, 2a. Edição, Florianópolis, 2000.
- [11] MARROQUIN, M., *Using Sound Quality in the Automotive Industry*, B&K Instruments, Chicago, IL USA.
- [12] NEUTRIK-CORTEX INSTRUMENTS, *Psicoacústica - Uma Ferramenta para Projetos Industriais de Áudio*, Santo Ângelo Indústria e Comércio Ltda, Informativo técnico 001.
- [13] ONUSIC, H. e HAGE, M.M., *Available Parameter for Acoustic Qualification/Quantification*, Palestra apresentada no V SIBRAV - Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular, São Bernardo do Campo, 1999.
- [14] *Programa Silêncio* - Resolução CONAMA 02/90
- [15] *Selo Ruído* - Resolução CONAMA nº 20/95
- [16] Gomes, M., Gerges, S., "Obtenção de parâmetros acústicos de uma sala, usando a técnica de medição MLS (Maximum Length Sequences) e simulação numérica". Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica, p. 355, 1998.
- [17] Kuttruff, H., "Auralization of Impulse Responses Modeled on the basis of Ray-Tracing Results". Journal of the Audio Engineering Society, V. 41 (11), 1993.
- [18] Sampaio, R., "Aplicações da Teoria dos Números em Acústica: Técnica de MLS e Difusores". Dissertação de Mestrado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.
- [19] Terai, T., Kawai, Y., "Boundary Element Methods in Acoustics". Edited by Ciskowski, R. e Brebbia, C., Computational Mechanics Publications, Chap. 10, p. 193-221, 1991.
- [20] Vorländer, M., "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image source algorithm". Journal of the Acoustical Society of America, V. 86(1), 1989.
- [21] Vorländer, M., "International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations". Proceedings of the 15th ICA, 689, 1995.
- [22] Vorländer, M., "Applications of Maximum Length Sequences in Acoustics". Anais do I Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações, p. 35-44, 1996.
- [23] Vorländer, M., "Recent Progress In Room Acoustical Computer Simulation", Anais do I Congresso Iberoamericano de Acústica, p. 43-52, 1998.

# DIFUSÃO SONORA EM SALAS: PARADIGMAS DO PASSADO E ESTADO DA ARTE

**Sylvio R. Bistafa**

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecânica

e-mail: sbistafa@usp.br

Resumo: A difusão sonora em salas vem atraindo considerável interesse, principalmente após a introdução dos difusores com perfis numericamente otimizados, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder. Tais difusores apresentam características estéticas a gosto das tendências arquitetônicas modernas, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. Suas características físicas de espalhamento sonoro podem ser obtidas experimentalmente, com metodologias em avançado processo de normatização internacional. Não tão bem caracterizados entretanto, são os efeitos subjetivos do espalhamento sonoro, a necessidade e a quantidade de difusão sonora necessária em salas para os mais diversos usos e programas. Ainda incertos, são os efeitos da difusão na modelagem de salas com programas tipo traçado de raios e na construção da realidade virtual - auralização. A apresentação fornecerá uma visão de como a difusão sonora era incorporada nas salas do passado e que são paradigmas no presente, a evolução, o estado da arte, e como a difusão sonora vem sendo modernamente incorporada em salas para os mais diversos usos: pequenas salas tais como estúdios de gravação de áudio e salas de audição crítica, e grandes salas para música sinfônica e ópera.

## 1. INTRODUÇÃO

A difusão sonora vem sendo cada vez mais considerada no projeto acústico de salas, principalmente após a introdução dos difusores perfilados com seqüências numéricas, conhecidos genericamente como difusores de Schroeder. Tais difusores apresentam aspecto a gosto das tendências arquitetônicas modernas, o que tem ajudado a popularizar o seu uso. As características de espalhamento sonoro de difusores podem ser atualmente obtidas numérica e experimentalmente, estas últimas com metodologias normalizadas internacionalmente. Não tão bem caracterizados entretanto, são os efeitos subjetivos da difusão sonora e a quantidade de difusão necessária em salas para os mais diversos usos e programas. Ainda incerta é a modelagem de reflexões difusas em programas de simulação acústica de salas, e na construção da realidade virtual acústica — auralização. O presente trabalho fornece uma visão de como a difusão sonora era incorporada nas salas do passado e que são paradigmas no presente, a evolução, o estado da arte, e como a difusão sonora vem sendo modernamente incorporada em grandes salas de concerto.

## 2. SALAS PARADIGMAS DO PASSADO

A Figura 1 apresenta algumas salas de concerto construídas antes do século XX, consideradas de excelente qualidade acústica. As características arquitetônicas que parecem mais influenciar na qualidade acústica destas salas são: a forma retangular (“shoe-box”) e o relevo das superfícies.

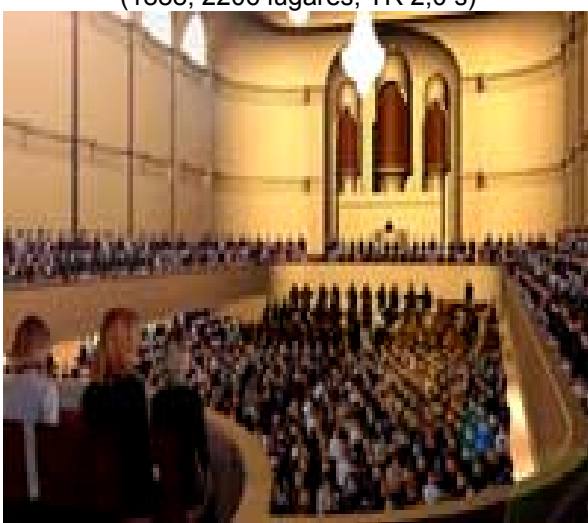
A Figura 2 mostra detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna, que são característicos das salas pré-século XX. Observa-se nesta tomada fotográfica a presença de nichos, colunas, capitéis, lustres, e o relevo das superfícies densamente ornamentado, estruturas estas determinantes da difusão sonora da sala. A difusão sonora é considerada uma característica essencial da qualidade acústica de salas de concerto.



**Concertgebouw, Amsterdam**  
(1888, 2206 lugares, TR 2,0 s)



**Symphony Hall, Boston**  
(1900, 2631 lugares, TR 1,8 s)



**Neues Gewandhaus, Leipzig**  
(1884-1944, 1560 lugares, TR 1,6 s)  
\*reconstrução digital



**Grosser Musikvereinssaal, Vienna**  
(1870, 1680 lugares, TR 2 s)

Figura 1: Algumas salas de concerto pré-século XX consideradas como de excelente qualidade acústica.



Figura 2: Detalhes de paredes e teto do Wiener Konzerthaus Grossersaal, Vienna.

### 3. EFEITO DA FORMA E DO RELEVO NAS FRENTES DE ONDA

No projeto arquitetônico de salas de concerto, a forma retangular, em leque e elíptica são freqüentemente escolhidas. Estas formas conferem características acústicas variáveis à sala e portanto, a seleção da forma básica da sala é de fundamental importância não somente do ponto de vista arquitetônico, como também do ponto de vista acústico.

A Figura 3 apresenta os resultados de simulação da propagação sonora bidimensional através de flashes instantâneos na sala de formato retangular, em leque e elíptico, todas elas sem tratamento de difusão sonora e com a mesma área em planta de aproximadamente  $518 \text{ m}^2$ . Estes resultados foram obtidos resolvendo numericamente, através do método das diferenças finitas, as equações diferenciais da continuidade e da quantidade de movimento em duas dimensões.

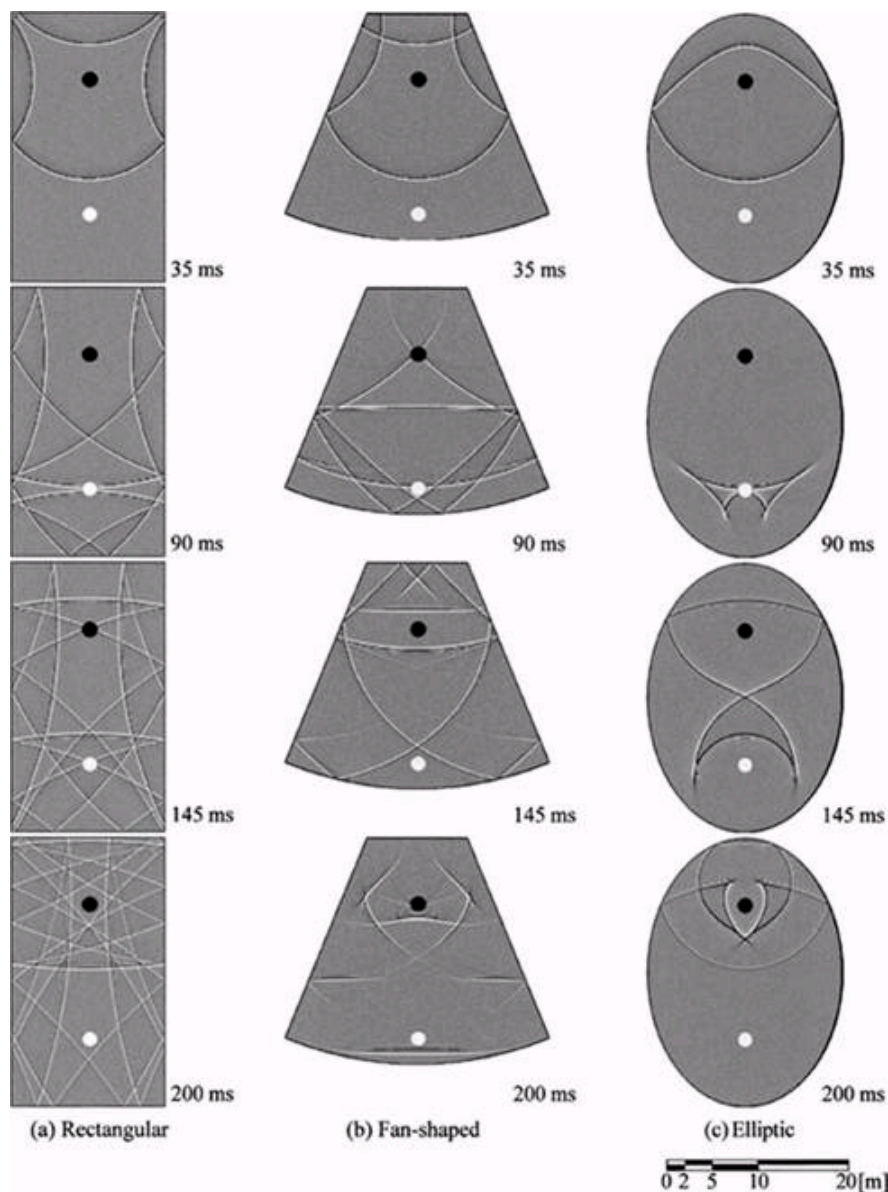


Figura 3: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica sem tratamento de difusão sonora (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

Em cada uma das ilustrações da Figura 3, os círculos escuros indicam a posição da fonte e os claros a posição do receptor, no cálculo da resposta impulsiva a ser apresentada mais adiante. Uma análise comparativa destas ilustrações revela que a propagação das frentes de onda é bastante distinta em cada uma das salas. Observa-se claramente, na sala retangular, que o número de frentes de onda aumenta à medida que o tempo avança, enquanto que na sala em leque e elíptica, há uma tendência à concentração, e ao desenvolvimento de frentes de ondas “defeituosas”. Particularmente na sala elíptica, e como era de se esperar, a frente de onda é focada alternadamente na região da fonte, e na sua posição simétrica junto ao receptor.

A Figura 4(a) apresenta as respostas impulsivas no receptor, em cada uma das salas sem tratamento de difusão sonora. Estes resultados revelam que as reflexões são densas e com decaimento suave no caso da sala retangular, enquanto que as reflexões são esparsas e irregulares nas salas em leque e elíptica.

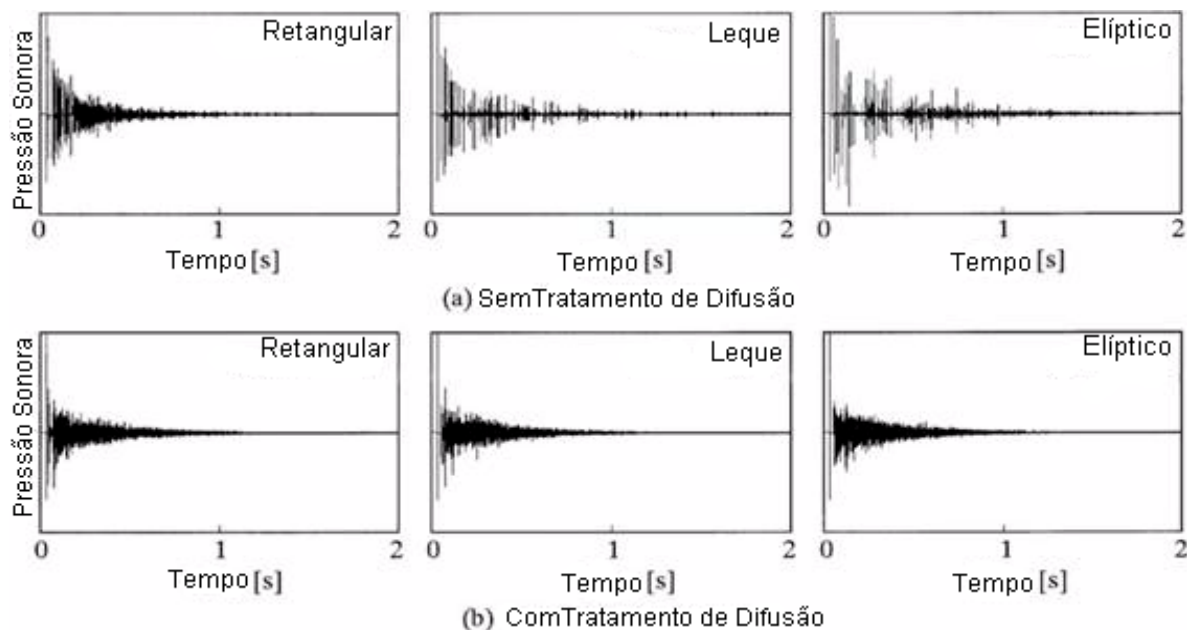


Figura 4: Respostas impulsivas calculadas nos receptores das Figuras 3 e 5 (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

A Figura 5 ilustra o efeito do tratamento de difusão na propagação sonora. Aqui, o tratamento de difusão consiste de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6) introduzido nos contornos de cada sala. A comparação destes resultados com aqueles da Figura 3 revela que a introdução do tratamento de difusão ameniza e espalha consideravelmente as frentes de onda nas três salas.

O efeito do tratamento de difusão nas respostas impulsivas poderá ser visualizado na Figura 4(b). Fica óbvio que as respostas impulsivas tornaram-se mais densas e suavizadas quando comparadas com as respostas impulsivas das respectivas salas sem tratamento de difusão sonora (Fig. 4a).

A Figura 6 ilustra o efeito de quatro diferentes tratamentos de difusão na sala retangular. Os resultados apresentados nesta figura são para os relevos esquematizados na parte inferior desta figura. Observa-se que o espalhamento depende das dimensões do relevo. Para o relevo Tipo 1, frentes de onda relativamente intensas e contínuas são ainda detectadas, havendo uma suavização progressiva com o tempo para os relevos Tipo 2 e 3. Observa-se claramente a eficácia do relevo Tipo 4 em amenizar as frentes de onda.

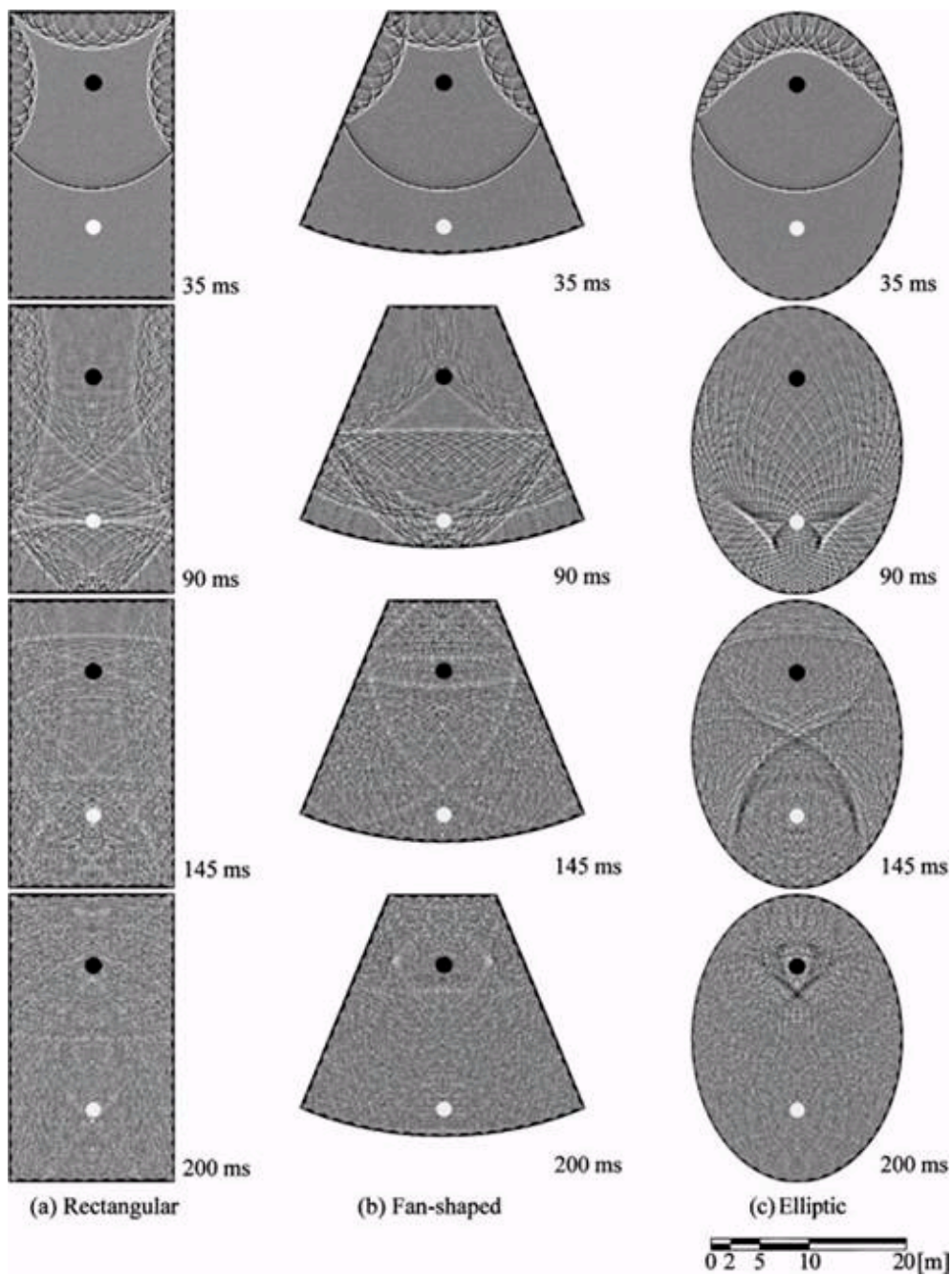


Figura 5: Propagação sonora na sala retangular, em leque e elíptica com tratamento de difusão sonora através de relevo na forma de zig-zag (Tipo 2 na Figura 6) (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).



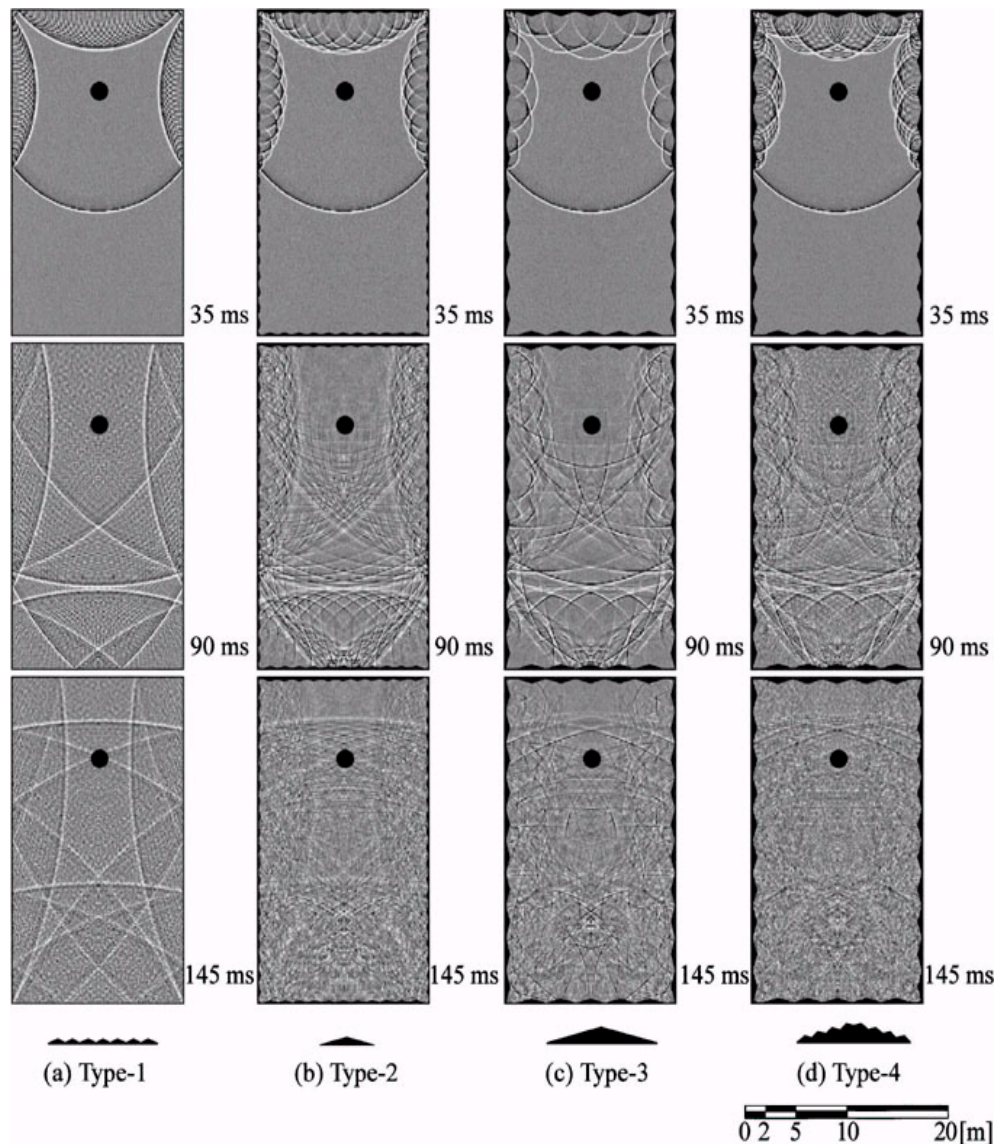


Figura 6: Propagação sonora na sala retangular com tratamento de difusão sonora (Fonte: T. Yokota *et al.* [1]).

#### 4. AVALIAÇÃO VISUAL DO ÍNDICE DE DIFUSÃO DE SUPERFÍCIES

A Figura 7 apresenta um quadro onde consta a classificação do *índice de difusão de superfícies* de 44 salas de concerto, obtidas por meio de inspeção visual do relevo das superfícies de paredes e teto destas salas. Como o quadro apresenta a compilação de 5 levantamentos realizados por diferentes autores, o índice de difusão de superfícies teve que ser normalizado numa escala de 0 a 1.

Observa-se que três salas apresentadas na Figura 1, e que são consideradas paradigmas de qualidade acústica, apresentam índice de difusão igual a 1, que é o valor máximo possível para este índice neste trabalho. A exceção ocorre para os resultados apresentados na terceira coluna, identificada como YH, com as três salas apresentando índice de difusão de apenas 0,3. Isto se deve ao fato de que estes resultados em particular foram obtidos tão somente por inspeção de tomadas fotográficas, e sem o acompanhamento e orientação dos avaliadores participantes do estudo.

Five visual assessments of the surface diffusivity indices of concert halls<sup>a</sup>

Name of hall	SDI				
	FF	SC	YH	CH	LB
Festspielhaus, Salzburg, Austria	0.8	1	0.5	0.8	1
<b>Grosser Musikvereinssaal, Vienna, Austria</b>	<b>0.8</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Palais des Beaux-Arts, Brussels, Belgium	0.5	0.5	0.5	0.3	
Radiohuset Studio 1, Copenhagen, Denmark	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5
Tivoli Koncertsal, Copenhagen, Denmark	0.5	0.5	0.3	0.5	
Carl Nielsen Hall, Odense, Denmark	0.5	0.5	0.3	0.5	
National Concert Hall, Dublin, Eire	1	1	0.3	0.5	
Berliner Philharmonie Hall, Berlin, Germany	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8
Beethovenhalle, Bonn, Germany	0.8	0.8	0.5	0.3	
Gewandhaus, Leipzig, Germany	0.5	0.5	0.5	1	
Herkulesaal, Munich, Germany	0.5	0.5	0.3	0.8	
Gasteig Philharmonie Hall, Munich, Germany	1	1	0.8	0.5	0.8
Liederhalle, Beethovensaal, Stuttgart, Germany	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5
Frederic R. Mann Auditorium, Tel Aviv, Israel	0.5	0.3			0.5
<b>Concertgebouw, Amsterdam, Netherlands</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Concert Hall De Doelen, Rotterdam, Netherlands	1	0.8	0.5	1	1
Music Center, Utrecht, Netherlands	0.8	0.8	0.5	0.3	
Berwald Hall, Stockholm, Sweden	0.8	0.8	0.3	0.5	
Stadt-Casino, Basel, Switzerland	0.8	1	0.3	0.8	0.8
Grosser Tonhallsaal, Zurich, Switzerland	0.8	1	0.5	0.8	1
Colston Hall, Bristol, UK	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3
St. David's Hall, Cardiff, UK	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5
Usher Hall, Edinburgh, UK	0.8	0.8	0.3	0.5	
Philharmonic Hall, Liverpool, UK	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5
Royal Festival Hall, London, UK	0.8	0.5	0.5	0.3	0.5
Barbican Concert Hall, London, UK	0.8	0.5	0.5	0.3	0.3
Derngate Centre, Northampton, UK	0.8	0.8	0.3	0.5	
Royal Concert Hall, Nottingham, UK	0.5	0.5	0.5	0.5	
Free Trade Hall, Manchester, UK	0.5	0.5	0.3	0.5	
Lyric Theatre, Baltimore, USA	0.5	0.5	0.3	0.8	
<b>Boston Symphony Hall, Boston, USA</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0.3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
Orchestra Hall, Chicago, USA	0.5	0.5	0.3	0.5	
Severance Hall, Cleveland, USA	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8
Boettcher Concert Hall, Denver, CO, USA	0.5	0.5	0.5	0.3	
Avery Fisher Hall, New York, USA	1	0.8	0.3	0.3	0.8
Carnegie Hall, New York, USA	0.8	0.8	0.5	0.8	
Academy of Music, Philadelphia, USA	0.8	1	0.5	0.5	
Eastman Theatre, Rochester, New York, USA	0.8	0.8	0.3	0.5	
L. M. Davies Symphony Hall, San Francisco, USA	1	1	0.5	0.8	0.8
War Memorial Opera House, San Francisco, USA	0.5	0.5	0.5	0.5	
The Grand Hall, Worcester, MA, USA	1	1	0.3	0.8	0.8
Roy Thomson Hall, Toronto, Canada	0.8	1	0.5	0.3	
Concert Hall, Sydney Opera House, Australia	1	1	0.5	0.5	
The Melbourne Concert Hall, Melbourne, Aust.	0.5	0.5	0.5		

<sup>a</sup> FF, Fricke's assessments; SC, Clarke's assessments; YH, the five-category, modified Han assessments; CH, Haan's assessments; LB, the five-category, modified Beranek assessments.

Figura 7: Cinco avaliações de índices de difusão de superfícies em 44 salas de concerto (Fonte: F.R. Fricke [2]).

## 8. CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES QUANTO AO SOM REFLETIDO

Dois coeficientes são empregados para caracterização do som refletido por superfícies: o coeficiente de difusão,  $d$ , e o coeficiente de espalhamento,  $s$ . Conforme ilustra a Figura 8, o coeficiente de difusão é uma medida da uniformidade do som refletido pela superfície; e conforme

ilustra a Figura 9, o coeficiente de espalhamento fornece a razão entre a energia refletida não especularmente, e a energia total refletida.

O coeficiente de difusão poderá ser obtido através de um ensaio normalizado pela Audio Engineering Society por meio da norma AES-4id-2001 [3].

A função de autocorrelação é utilizada para medir a similaridade da energia espalhada no espaço. Uma superfície que espalha energia uniformemente, produzirá um alto valor da função de autocorrelação espacial; enquanto que uma superfície que concentra a energia refletida em uma dada direção gerará um baixo valor. A fim de obter-se um número único característico da superfície, calcula-se, para uma dada posição da fonte, o coeficiente de autocorrelação de difusão,  $d_\psi$ , por meio de

$$d_\psi = \frac{\left( \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}$$

onde  $L_i$  é o  $i$ -ésimo nível de pressão sonora,  $n$  é o número de receptores na resposta polar, e  $\psi$  é o ângulo de incidência.

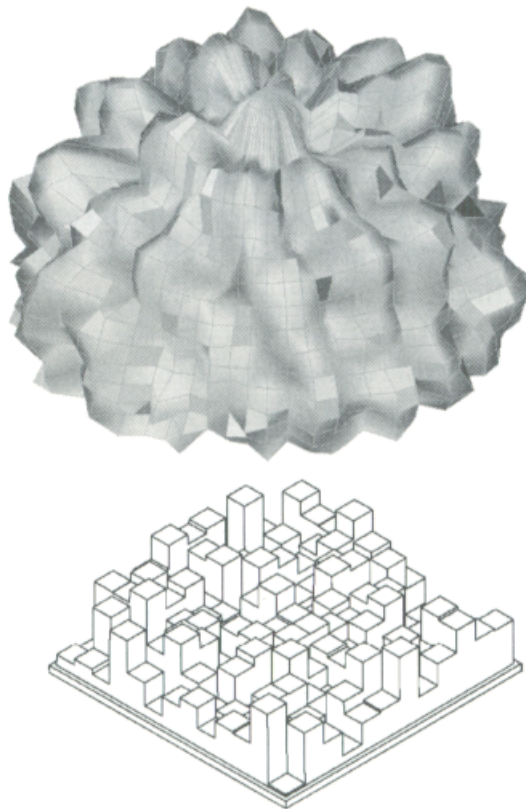


Figura 8: O coeficiente de difusão,  $d$ , caracteriza a uniformidade do som refletido pela superfície (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

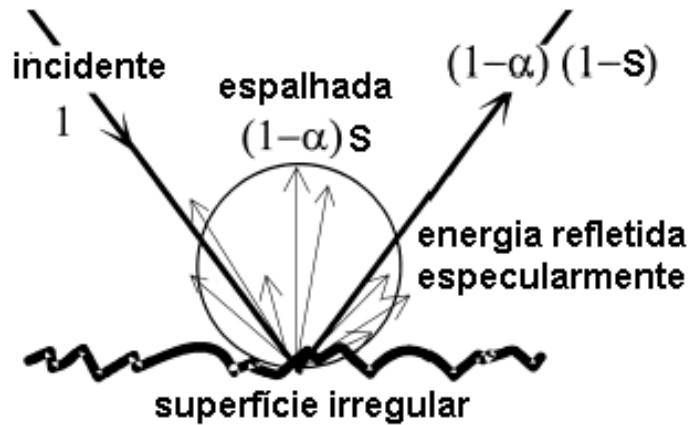
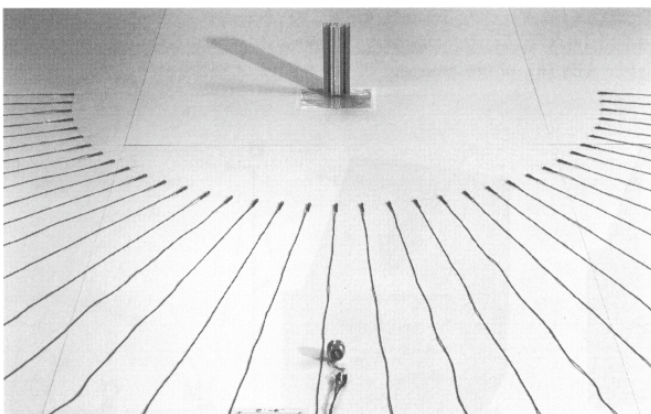
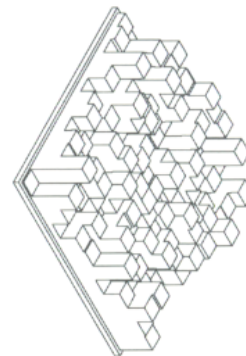


Figura 9: O coeficiente de espalhamento,  $s$ , caracteriza a capacidade da superfície em remover energia da região especular (Fonte: E. Mommertz e M. Vorlander [5]).

Conforme ilustra a Figura 10, as medições da resposta polar poderão ser feitas por meio de um goniômetro em 2D, em um semicírculo, ou em uma hemisfera, por meio de um goniômetro em 3D, em câmara anecóica. A escolha do goniômetro 2D/3D, depende do tipo de difusor. Quando a superfície produz espalhamento em um plano, a obtenção da resposta polar em um único plano é suficiente. Quando a superfície gera espalhamento em planos múltiplos, então uma avaliação hemisférica é necessária.



Medição em 2 D.



Medição em 3 D.

Figura 10: Determinação experimental do coeficiente de difusão em 2D e 3D (Fonte: AES-4id-2001 [3]).

A Figura 11 apresenta coeficientes de difusão em função da frequência de quatro superfícies. Observa-se nesta figura que, a exceção da superfície convexa, há uma marcante variação do coeficiente de difusão com a frequência para as outras três superfícies. Observa-se também que superfície plana nas baixas frequências, apresenta coeficiente de difusão próximo de 0,8; ou seja, a primeira vista, a superfície plana poderia ser considerada um bom difusor em baixas frequências. No

entanto, será mais adiante demonstrado que a resposta polar não é suficiente para caracterizar a capacidade de difusão de uma superfície. A superfície convexa apresenta coeficiente de difusão próximo de 1 em ampla faixa de frequências; ocorre que não se pode normalmente cobrir uma grande superfície com um único semicilindro.

A Figura 12 apresenta o setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante segundo o procedimento normalizado pela ISO 17497-1 [6]. De acordo com esta norma, o coeficiente de espalhamento poderá ser obtido em escala real ou em um modelo em escala reduzida. A superfície sob teste é colocada sobre uma mesa giratória em uma câmara reverberante. Quando a superfície a ser testada é muito grande, existe problemas logísticos em fabricar-se uma mesa giratória compatível com as dimensões da amostra. Por exemplo, as portas da câmara reverberante serão provavelmente de dimensões que não permitem a colocação da mesa e da amostra na câmara. Por esta e outras razões, é preferível realizar os testes em modelos e câmaras em escala reduzida.

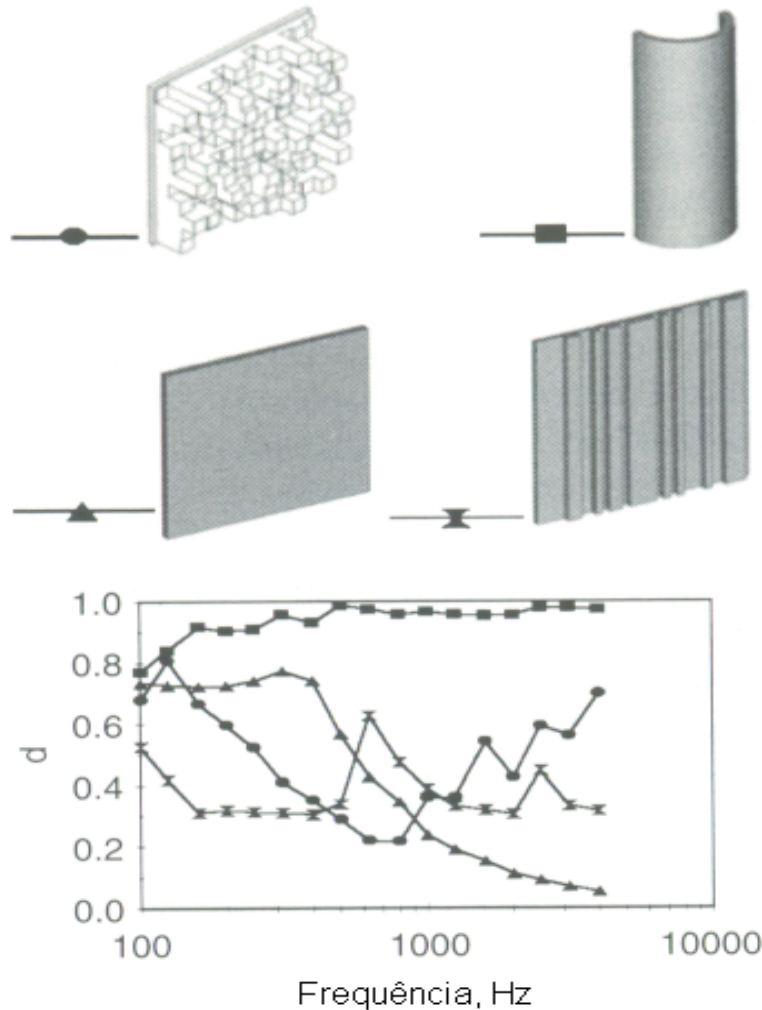


Figura 11: Variação do coeficiente de difusão com a frequência de algumas superfícies (Fonte: T.J. Hargreaves *et al.* [7]).

Já o coeficiente de espalhamento é obtido medindo-se o coeficiente de absorção para incidência aleatória,  $\alpha$ , e o coeficiente de absorção especular,  $\alpha_s$ , e empregando-se a seguinte fórmula

$$s = \frac{\alpha_s - \alpha}{1 - \alpha}.$$

Estes coeficientes de absorção são obtidos por meio das seguintes expressões, e medindo-se tempos de reverberação conforme Quadro 1.

$$\alpha = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - \frac{4V}{S} (m_2 - m_1)$$

$$\alpha_s = 55,3 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) - \frac{4V}{S} (m_4 - m_3)$$

Tempo de Reverberação	Amostra	MESA GIRATÓRIA
$T_1$	Ausente	Parada
$T_2$	Presente	Parada
$T_3$	Ausente	Girando
$T_4$	Presente	Girando

Quadro 1: Condições da mesa e amostra durante as medições dos tempos de reverberação para determinação dos coeficientes de absorção e de espalhamento.

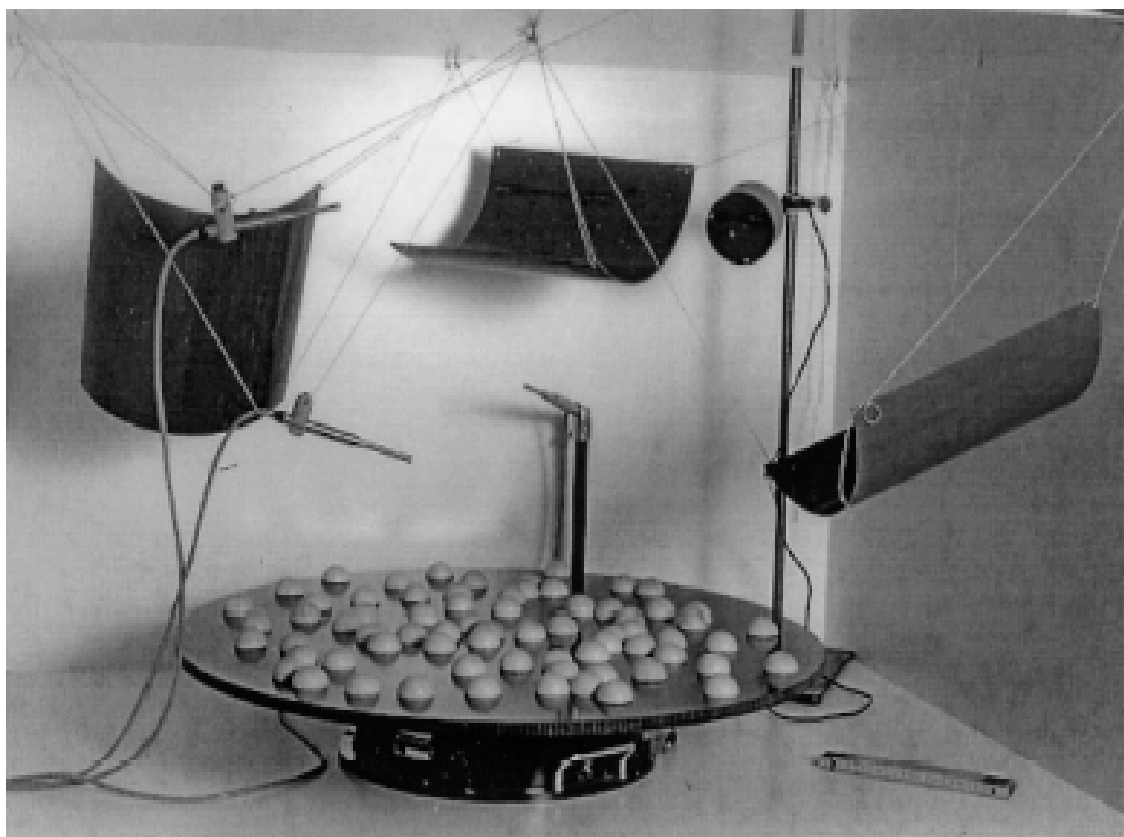
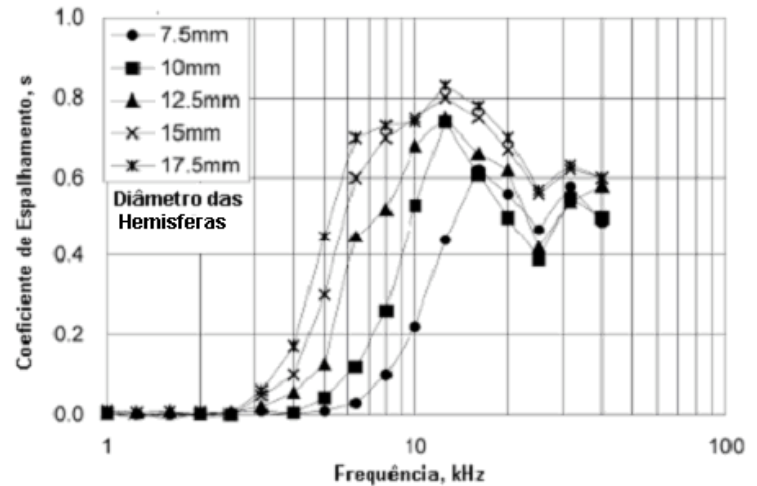


Figura 12: Setup para determinação experimental do coeficiente de espalhamento em câmara reverberante (Fonte: E. Mommertz e M. Vorlander [5]).

A Figura 13 apresenta a variação do coeficiente de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros, obtidos em uma câmara reverberante na escala de 1:10.



(a)



(b)

Figura 13: a) Câmara reverberante na escala de 1:10 utilizada na determinação dos coeficientes de espalhamento de uma superfície coberta com hemisferas de diferentes diâmetros. b) Coeficientes de espalhamento em função da frequência (Fonte: J.Y. Jeon *et al.* [8]).

## 9. CONTRASTANDO COEFICIENTE DE DIFUSÃO E COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO

O coeficiente de espalhamento fornece resultados ambíguos quando a superfície é anisotrópica. A Figura 14 apresenta coeficientes de espalhamento em função da frequência de dois difusores: um difusor extrudado, conhecido como difusor de único plano, ou difusor 1D, por produzir espalhamento em um único plano, e um difusor que produz espalhamento em múltiplos planos, conhecido como difusor hemisférico.

Observa-se na Figura 14 que apesar de serem difusores bem diferentes, o comportamento do coeficiente de espalhamento em função da frequência é praticamente o mesmo para ambos difusores. O difusor 1D gera um coeficiente de espalhamento tão elevado quanto o difusor hemisférico a partir de 500 Hz, mesmo sendo tão somente um plano extrudado em uma única direção. Isto ocorre pois a topologia muda dramaticamente quando a superfície é girada durante o ensaio, e portanto esta superfície é vista como um bom difusor pelo coeficiente de espalhamento.

Enquanto que o coeficiente de difusão contém informações da capacidade que a superfície tem em espalhar som para todas as direções, o coeficiente de espalhamento não inclui nenhuma informação quanto à direção do som refletido. A Figura 15, apresenta o espalhamento gerado por uma superfície plana, e por uma superfície plana que foi girada de 20°, no sentido de redirecionar a reflexão especular para uma outra direção. Observa-se que o coeficiente de difusão mede a capacidade de espalhamento de ambas as superfícies como sendo a mesma. Entretanto, o coeficiente de espalhamento “enxerga” o redirecionamento de energia como espalhamento, fornecendo portanto um alto coeficiente de espalhamento da superfície plana, a qual no entanto foi simplesmente girada, sem contudo ter-se conseguido dispersão — somente redirecionamento.

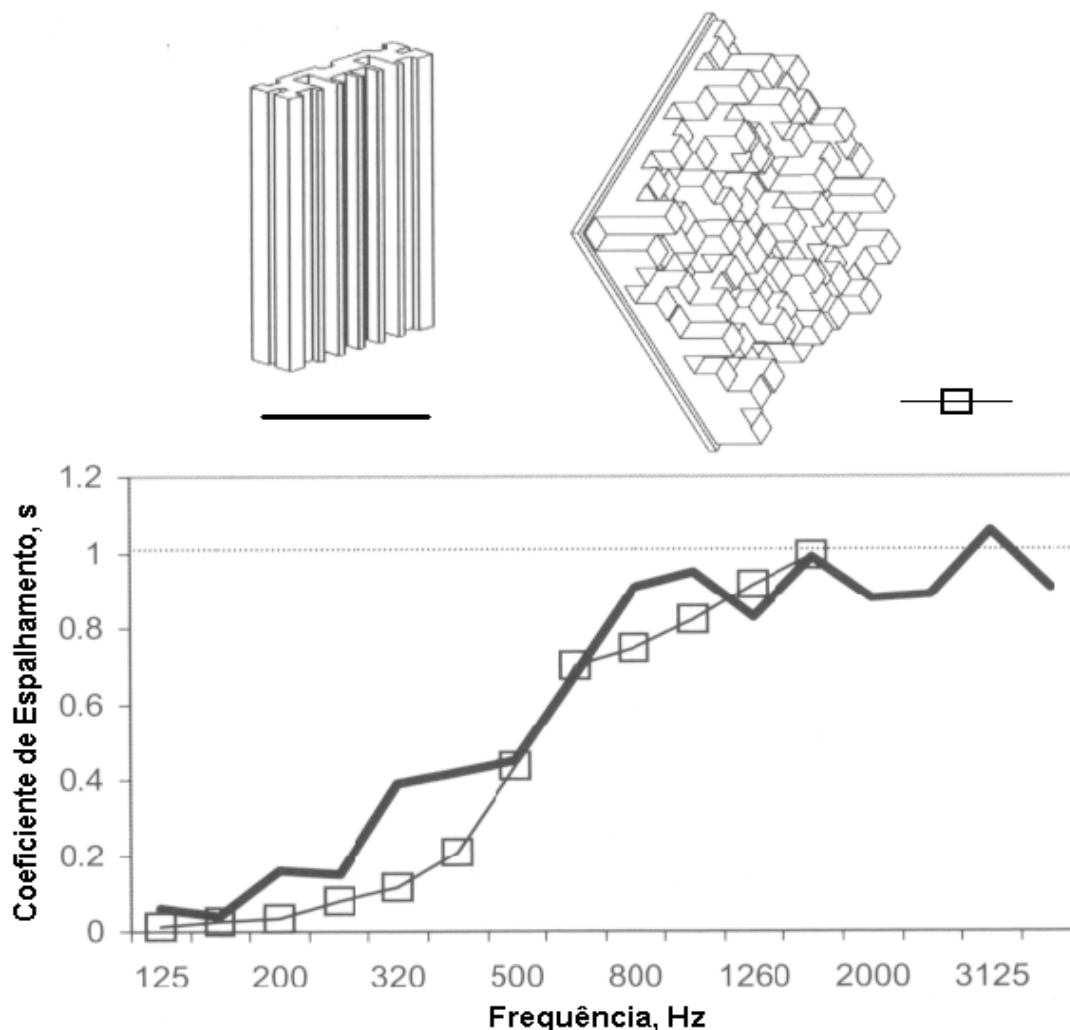


Figura 14: Coeficientes de espalhamento para dois difusores de diferentes geometrias. O difusor da esquerda é um difusor de único plano, o da direita é um difusor hemisférico (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

No projeto de difusores o objetivo maior é medir-se a capacidade que a superfície tem em espalhar som em todas as direções, e não de simplesmente medir-se a capacidade da superfície em remover energia da região especular. Desta forma, é importante para os projetistas de difusores, que o coeficiente que mede as características do som refletido, tenha condições de diferenciar redirecionamento de dispersão.

A base do coeficiente de espalhamento é a de separar o som refletido especularmente, do som espalhado em outras direções. Este coeficiente é de utilidade em programas de simulação acústica de salas que se baseiam nos princípios da acústica geométrica (traçado de raios, de cones, método das imagens especulares, etc.). Estes programas geralmente possuem algoritmos separados, um para lidar com as componentes especulares, e outro para lidar com as componentes espalhadas, no sentido de tornar a simulação mais condizente com a física do problema, e na tentativa de reduzir as incertezas das predições.

O coeficiente de espalhamento preocupa-se tão somente com a quantidade de energia que é removida da direção especular — este coeficiente não mede a qualidade da dispersão. Por esta razão, quando o objetivo é avaliar a qualidade do espalhamento, o coeficiente de difusão é o mais adequado. No entanto, este coeficiente não deve ser utilizado indiscriminadamente nos programas de simulação baseados nos princípios da acústica geométrica, uma vez que o coeficiente de difusão é incompatível com os modelos de espalhamento de superfícies usado nos algoritmos destes programas.

A existência de dois coeficientes para medir as características do som refletido dá margem a muita confusão. Por isto, é importante que os interessados no assunto sejam educados quanto às diferenças, uma vez que o uso inadequado destes coeficientes poderá resultar em predições errôneas ou num mau projeto.



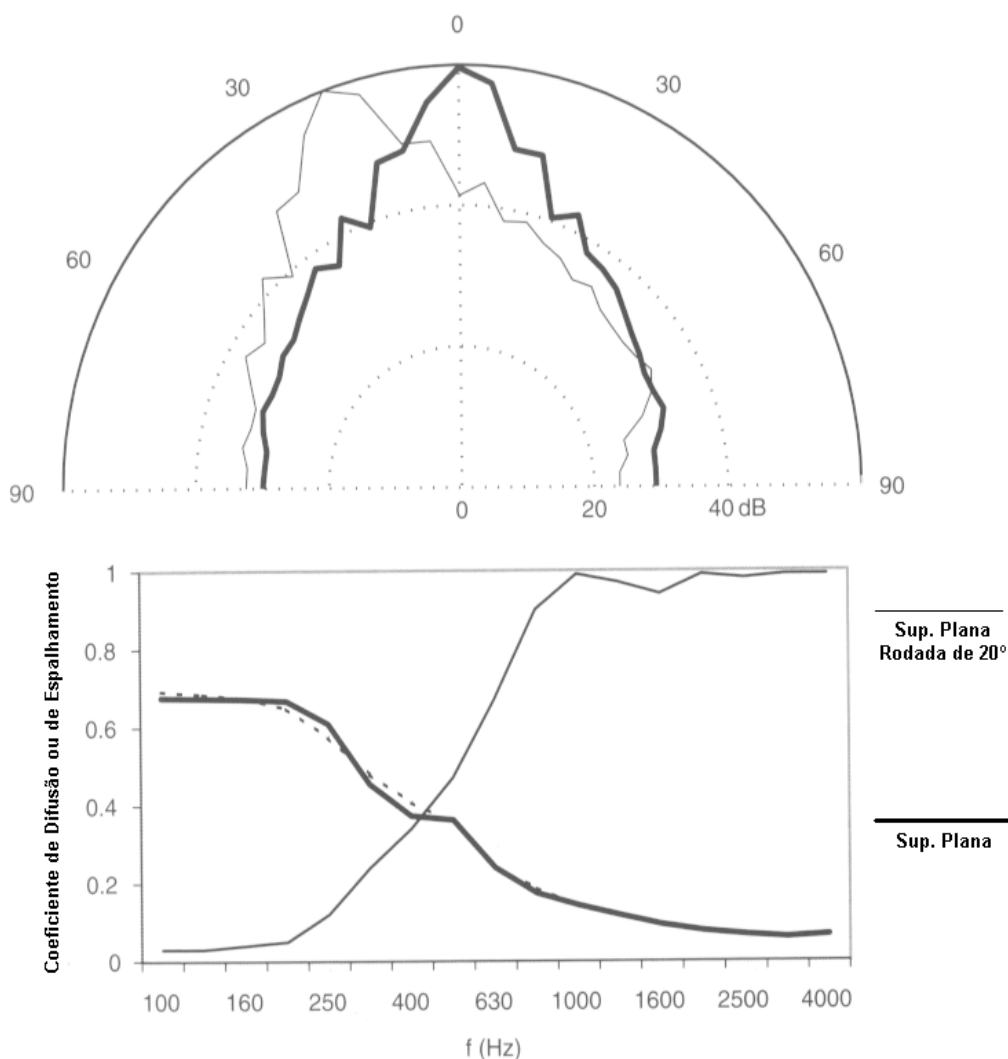


Figura 15: Em cima, resposta polar de uma superfície plana, e de uma superfície plana rodada de 20°. Embaixo, coeficientes de difusão e de espalhamento em função da frequência (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [9]).

## 10. RESPOSTA TEMPORAL E RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE DIFUSORES

A Figura 16 apresenta construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder). No caso da superfície plana, a frente de onda refletida permanece inalterada após a reflexão. Conseqüentemente, o som proveniente da fonte sonora é refletido integralmente de volta, sem dispersão, o que poderá gerar eco, particularmente se a fonte for um instrumento direcional como um trompete. No caso da superfície cilíndrica, a frente de onda refletida é agora semicircular, e que parece ter sido originada de uma fonte pontual no centro do semicilindro. Conseqüentemente, o semicilindro gera dispersão espacial. Ocorre que as frentes de onda são ainda muito ordenadas; assim, embora o semicilindro seja uma boa geometria para gerar dispersão espacial, não se trata do melhor difusor pois não produz *dispersão temporal*. Já o difusor de Schroeder altera a fase das frentes de ondas refletidas, e que além de gerar dispersão espacial, gera também dispersão temporal.

A Figura 17 ilustra a aplicação de difusores cilíndricos nas paredes laterais do Hummingbird Centre em Toronto. A reforma desta sala incluía a instalação de um sistema de reverberação artificial, que gerava reflexões por meio de alto-falantes montados nas paredes laterais. Ocorre que tais reflexões eram muitas vezes percebidas como ecos pela platéia. Como não fazia sentido eliminar os ecos com absorção, já que a absorção remove energia da sala, reduzindo a reverberação, a solução adotada foi a de promover dispersão do som lateral por meio de difusores cilíndricos.

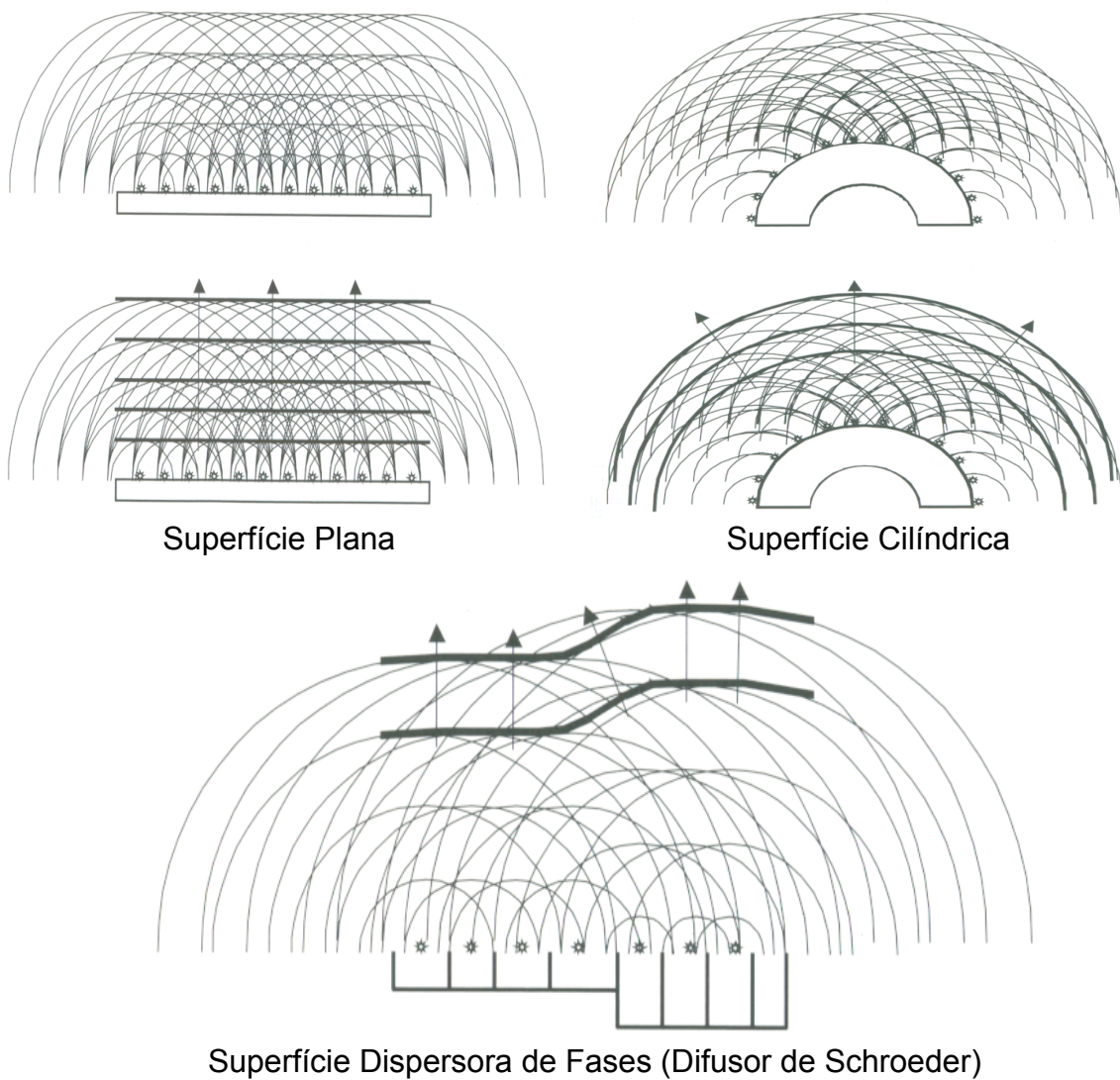


Figura 16: Construções aproximadas de Huygen da reflexão de uma onda plana numa superfície plana, numa superfície cilíndrica e numa superfície dispersora de fases (difusor de Schroeder) (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [10]).

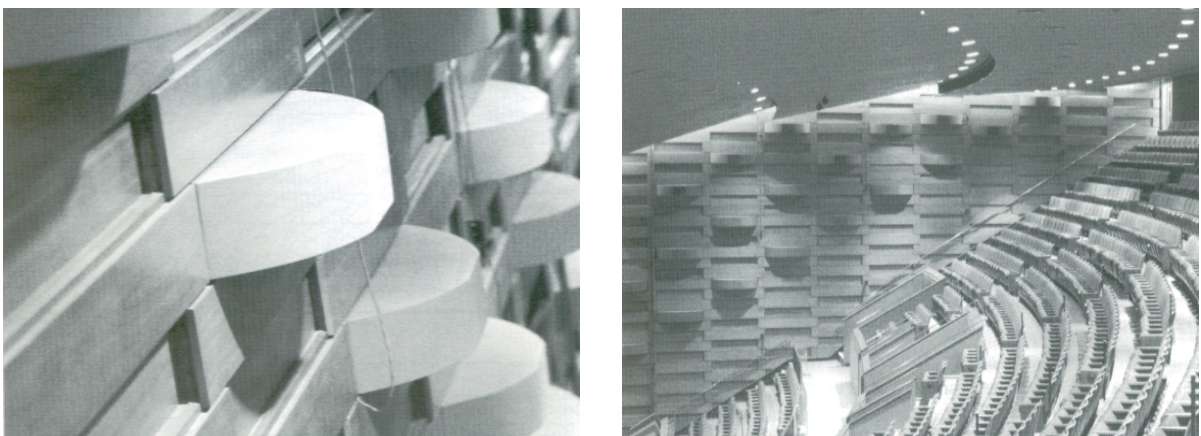


Figura 17: Tratamento das superfícies laterais do Hummingbird Centre, Toronto, com difusores cilíndricos (Fonte: P. D'Antonio e T.J. Cox [11]).

A Figura 18 ilustra a resposta temporal de um difusor dispersor de fases, a qual é apresentada juntamente com a resposta espacial. A resposta temporal do difusor é caracterizada por uma série de reflexões ao longo. A resposta temporal é também conhecida como resposta impulsiva.

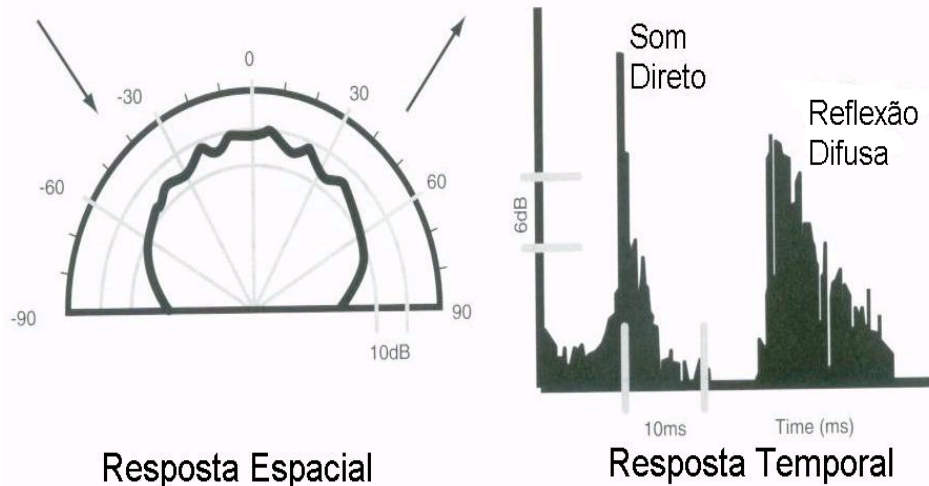


Figura 18: Resposta espacial e temporal de um difusor dispersor de fases (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

O difusor pode também ser caracterizado pela *resposta em frequência*, obtida aplicando-se a transformada de Fourier na resposta impulsiva. A Figura 19, apresenta a resposta temporal e a resposta em frequência do campo sonoro total, som direto mais reflexão especular no primeiro caso, e som direto mais reflexão difusa no segundo caso.

No observador, ocorre uma combinação do som que provém diretamente da fonte, chamado de som direto, e do som refletido pela superfície. Quando o som direto combina-se com uma reflexão especular gerada por uma superfície plana, há formação do chamado filtro pente (“comb filter”), conforme ilustra a Figura 19. O espaçamento entre as frequências está relacionado com o atraso, e a profundidade das cavas está relacionada com a amplitude relativa, do som direto e da reflexão especular. Este tipo de campo sonoro ocorre próximo a grandes paredes e refletores, quando não tratados com absorção ou difusão, e que dá origem ao chamado som “colorido” — ênfase de determinadas frequências em detrimento de outras.

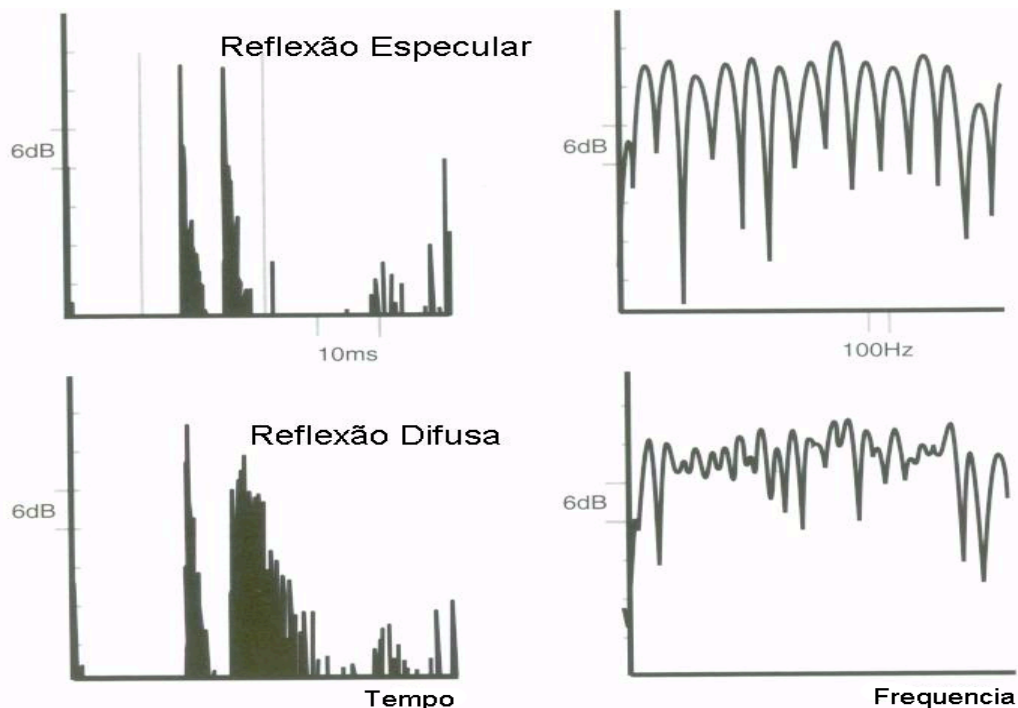


Figura 19: Resposta temporal e resposta em frequência do som direto combinado com reflexão especular e do som direto combinado com reflexão difusa (Fonte: P. D'Antonio e T.J. Cox [11]).

Quando o som direto combina-se com uma reflexão difusa, a regularidade do filtro pente é minimizada, com redução dos níveis da resposta em frequência, conforme ilustra a Figura 19. O conteúdo espectral do som direto poderá ser mais bem percebido, e como originalmente produzido.

Além de promover dispersão espacial, a redução do filtro pente é a principal razão do emprego de difusores em muitas aplicações.

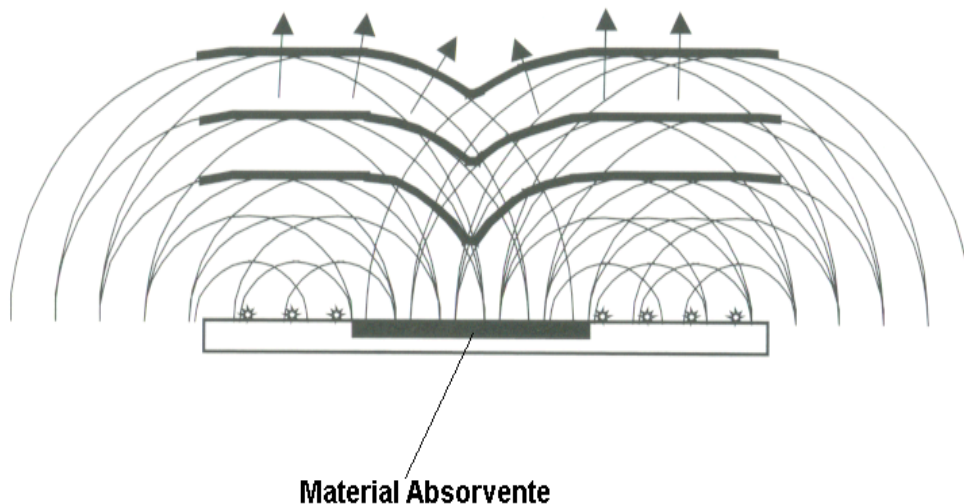


Figura 20: Construção aproximada de Huygen da reflexão de uma onda plana sobre uma superfície híbrida (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

Uma outra forma de gerar um difusor é através da combinação de reflexão com absorção. Adicionando-se placas de material absorvente em uma parede reflexiva, as fontes secundárias na construção de Huygen estarão ausentes na região da parede coberta com material absorvente, gerando dispersão, conforme ilustra a Figura 20. Esta superfície, chamada de híbrida, produz dispersão modesta abaixo da frequência na qual a dimensão do painel é menor que a metade do comprimento de onda nesta frequência. Por outro lado, para obter-se reflexões em altas frequências, as dimensões dos painéis devem ser muito pequenas, sendo que a distribuição dos painéis torna-se importante. Superfícies híbridas são parcialmente absorventes, portanto só devem ser utilizadas em situações onde se necessita simultaneamente de controle da reverberação e de dispersão.

## 11. CAMPO PRÓXIMO E CAMPO AFASTADO DO DIFUSOR

Os resultados de medições da resposta polar dependem das distâncias da fonte e do receptor até a superfície, a menos que ambos, fonte e receptor, estejam no campo afastado. (O campo afastado ocorre quando o som refletido cai de 6 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 3D, e de 3 dB para cada duplicação da distância para geometrias em 2D.) Ocorre que, na maioria das salas, é comum que fontes e receptores estejam no campo próximo e não no afastado, a menos que a superfície seja muito pequena. A Figura 21 apresenta a resposta polar de uma superfície plana, para várias distâncias da superfície até o receptor. Observa-se nesta figura, que na resposta polar, uma superfície plana aparenta ser um bom difusor quando as medições são feitas próximas à superfície. Este comportamento parece contradizer a idéia que se tem de que uma superfície plana é um mau difusor. Ocorre que, conforme discutido anteriormente, a superfície plana não gera dispersão temporal, sendo esta a razão pela qual trata-se de um mau difusor. A resposta polar não revela a fase das frentes de onda.

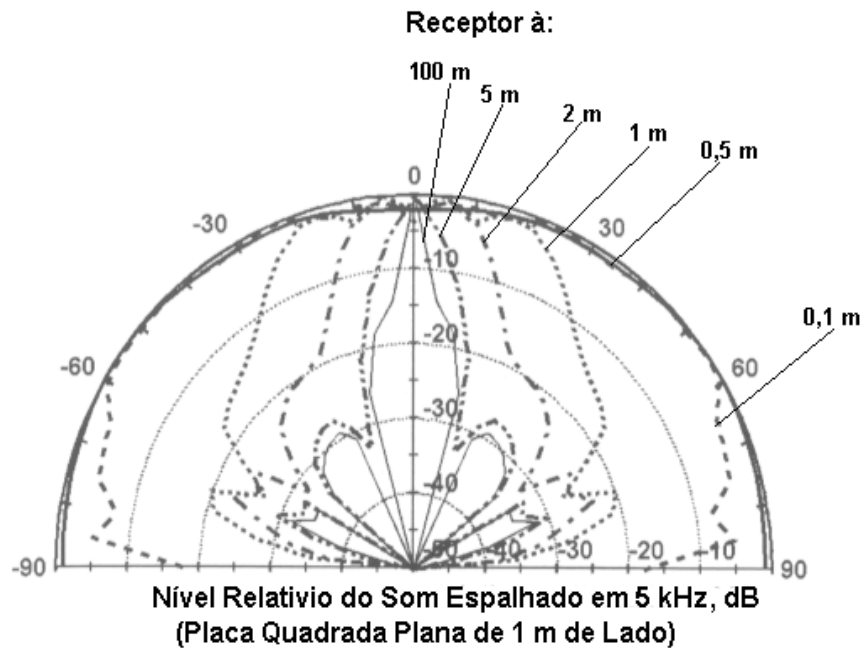


Figura 21: Efeito da distância do receptor na resposta polar de um painel quadrado de 1 m de lado. A fonte dista 100 m do painel (Fonte: T.J. Hargreaves *et al.* [7]).

Como no campo próximo a resposta polar varia com a distância, a solução normalmente adotada é a de medir-se a resposta polar de difusores no campo afastado, mesmo que esta distância seja maior que aquela onde os ouvintes estarão situados. A distância de campo afastado é normalmente adotada como aquela a partir da qual as diferenças de trajetórias entre pontos da superfície e o receptor, sejam pequenas quando comparadas com o comprimento de onda na frequência de interesse. Como em certos casos esta distância poderá ser muito grande, o que tornaria impraticável medições da resposta polar em câmara anecóica, a norma AES-4id-2001 [3] recomenda que a distância adotada nas medições poderá ser mais curta, porém garantindo que pelo menos 80 por cento dos ouvintes esteja fora da zona especular do difusor.

## 12. MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDIÇÃO DE ESPALHAMENTO

No projeto e na caracterização de superfícies difusoras, torna-se necessário prever o campo sonoro refletido pela superfície. Atualmente isto é feito apenas considerando o espalhamento da superfície isoladamente, já que a predição na situação real de aplicação do difusor em uma sala, onde todas as suas superfícies são simultaneamente modeladas, requer tempo computacional excessivamente longo e capacidade de armazenamento muito grande.

Existem diversos modelos para predição do espalhamento de superfícies, desde os numericamente exatos porém computacionalmente intensos e lentos, até os rápidos porém que fornecem resultados com maior incerteza. O Quadro 2 apresenta modelos utilizados para predição do espalhamento de superfícies, juntamente com suas principais características.

O modelo de Fraunhofer, por ser o mais simples, é utilizado quando se deseja ter uma idéia do desempenho do difusor, sendo somente aplicável no campo afastado, quando ambos, fonte e receptor, estão longe da superfície.

O modelo de Fraunhofer é bem conhecido no campo da ótica e de processamento de sinais, e permite estimar rapidamente o espalhamento de uma superfície rígida e plana no campo afastado. No entanto este modelo será mais útil se for possível modificá-lo para possibilitar a análise de superfícies que não possuem coeficiente de reflexão unitário. Um exemplo, seria o de aplicá-lo na análise do difusor de Schroeder, o qual poderá ser modelado como uma superfície plana de impedância com fase variável. Quando este modelo é introduzido na solução de Fraunhofer, a expressão que permite obter a pressão sonora espalhada é dada por

$$p_s(\mathbf{r}) = -\frac{jk}{8\pi^2} e^{-jk(r+r_0)} \sin c\left(\frac{kb}{r}\right) [\cos(\theta) + 1] \int_{-a}^a R(r_s) e^{jkx_s \sin(\theta)} dx_s,$$

sendo que a Figura 22 ilustra um difusor de Schroeder com a geometria associada a esta equação.

Modelo	Exatidão	Tempo Computacional	Observações
Elementos de Contorno (BEM)	o melhor	o mais lento	<i>Preciso contanto que as superfícies sejam de reação localizada e as perdas viscosas sejam pequenas. Lento, particularmente para superfícies grandes em altas frequências.</i>
BEM p/ Paineis Fino	↑	↑	<i>Método eficiente para superfícies de pequena espessura, permitindo reduzir pela metade os elementos de um BEM padrão.</i>
Kirchhoff	↓	↓	<i>Utiliza as condições de contorno de Kirchhoff para aproximar pressões nas superfícies e portanto é muito mais rápido. Menor precisão em baixas frequências, e em superfícies com variações bruscas de impedância e de geometria.</i>
Fresnel			<i>Substitui a integração numérica do modelo de Kirchhoff por meio das integrais de Fresnel. Requer espalhamento ortogonal em duas direções sobre a superfície. Permite algumas simplificações para superfícies planas e curvas.</i>
Fraunhofer ou Fourier	o pior	o mais rápido	<i>Simplifica a integração numérica do modelo de Kirchhoff, sendo somente aplicável no campo afastado. Permite a aplicação dos modelos mais simples de Fourier. Bom para o entendimento dos fenômenos físicos, porém de pouca precisão.</i>

Quadro 2: Modelos para predição do espalhamento de superfícies.

Esta equação é essencialmente aquela usada por Schroeder no projeto de difusores dispersores de fase. Costuma-se omitir o termo  $[\cos\theta + 1]$ , sendo que esta simplificação transforma a equação essencialmente numa transformada de Fourier, e é por este motivo que o modelo de Fraunhofer é também chamado de Fourier.

Por conveniência e por manter a compatibilidade com Schroeder, a solução de Fraunhofer/Fourier poderá ser re-escrita na forma

$$|p(\theta, \psi)| \approx \left| A \int_s R(x) e^{jkx[\sin(\theta) + \sin(\psi)]} dx \right|$$

onde  $R(x)$  é o coeficiente de reflexão,  $\theta$  é o ângulo de reflexão,  $\psi$  é o ângulo de incidência,  $k$  é o número de onda, e  $A$  uma constante.

Nesta equação, a transformação não se dá nas variáveis mais familiares tempo-frequência da transformada de Fourier, e sim na variável  $kx$ , e que transforma-a na variável  $[\sin(\theta) + \sin(\psi)]$ . Quando se escolhe coeficientes de reflexão  $R(x)$  com espectro de potência plano com relação a  $kx$ , então a amplitude será constante com relação a variável transformada  $[\sin(\theta) + \sin(\psi)]$ . Isto não significa porém, que o espalhamento será constante em todas as direções, pois a transformada não é simplesmente função de  $\theta$  e  $\psi$ , e sim que o espalhamento se dará em lóbulos de mesma energia conforme será visto a seguir.

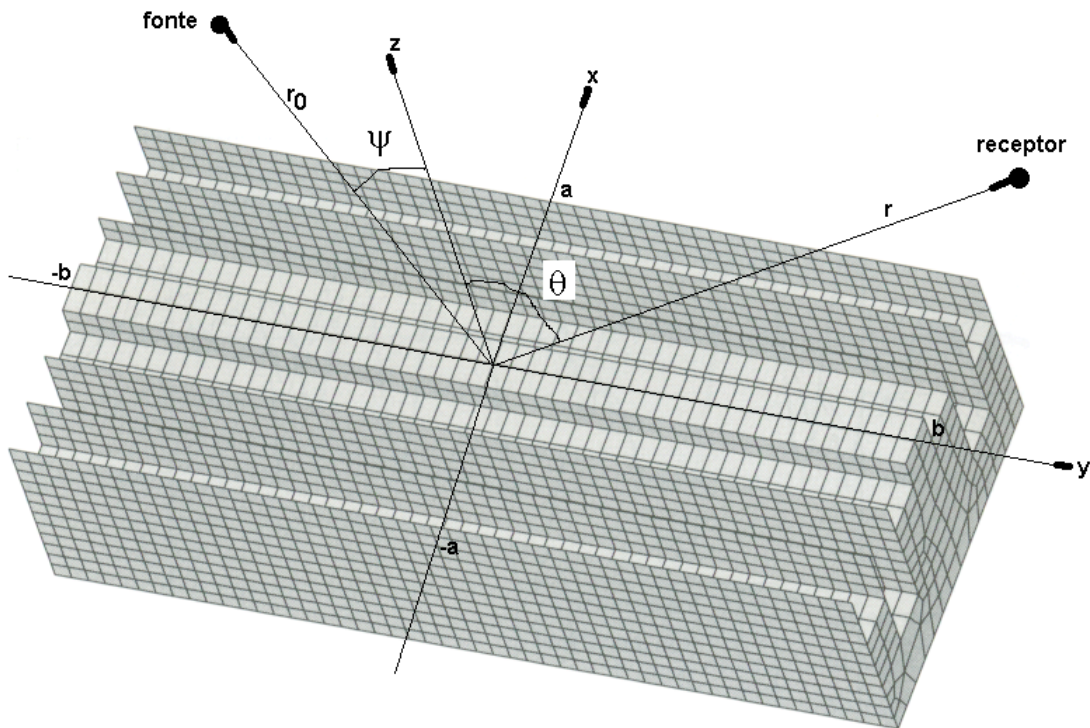


Figura 22: Difusor de Schroeder usado na solução de Fraunhofer/Fourier.

## 11. DIFUSORES DE SCHROEDER

A Figura 23 apresenta um difusor de Schroeder de único plano ou difusor 1D. Este difusor consiste de uma série de poços de mesma largura e com diferentes profundidades. Os poços são separados por aletas. A profundidade dos poços é determinada por uma seqüência numérica, tal como uma *seqüência de resíduos quadráticos* (“quadratic residue sequence”). Difusores 1D apresentam um plano de dispersão máxima; já na direção ortogonal a este plano, a sua natureza extrudada faz com que este difusor se comporte essencialmente como uma superfície plana.

A análise do difusor 1D é normalmente feita no plano de máxima dispersão, o qual corta o difusor na sua seção transversal. A Figura 24 ilustra a seção transversal de um difusor perfilado com uma seqüência de resíduos quadráticos, e que é conhecido como QRD (“quadratic residue diffusor”).

A análise dos difusores de Schroeder é feita considerando-se uma onda plana incidente na direção  $y$ , no sentido contrário ao da orientação deste eixo na Figura 24. A onda plana é refletida no fundo dos poços, sendo que cada poço reflete uma onda na direção e sentido do eixo  $y$ . Assume-se que não há perdas de energia neste processo. A pressão em um ponto externo ao difusor será dada pela interferência das ondas que são irradiadas por cada poço. Todas estas ondas têm a mesma amplitude porém diferentes fases, pois a fase de cada uma delas é determinada pelo tempo que cada onda leva para ir até o fundo do poço que a gerou e voltar. Conseqüentemente, a distribuição polar do espalhamento é determinada pela escolha da profundidade dos poços.

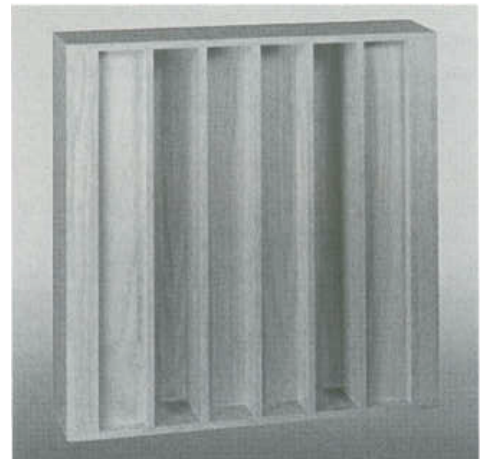


Figura 23: Difusor de Schroeder em 1D.

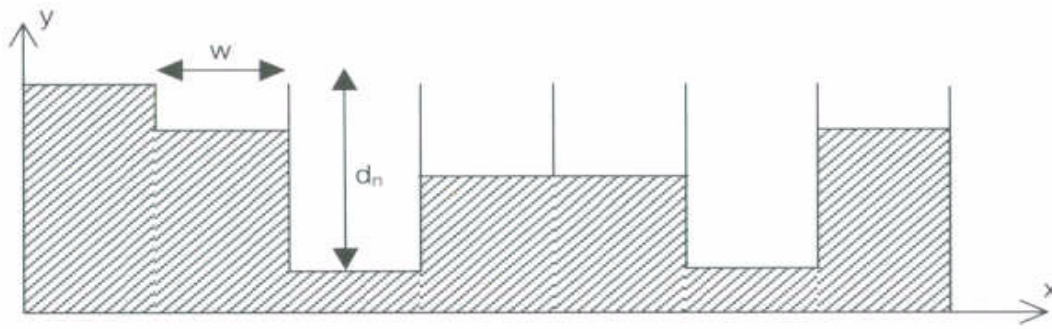


Figura 24: Seção transversal de um QRD.

Schroeder mostrou que a escolha de uma seqüência de resíduos quadráticos, gera uma distribuição polar em lóbulos de mesma energia difratada. A Figura 25 apresenta o espalhamento gerado por um difusor de Schroeder, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. O espalhamento foi obtido com o modelo de Fraunhofer/Fourier, onde se observa a geração de 11 lóbulos de mesma energia.

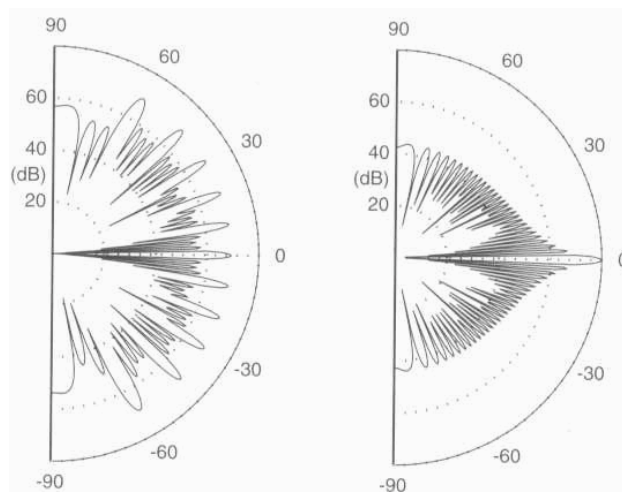


Figura 25: Espalhamento gerado por um difusor de Schroeder (à esquerda) e por uma superfície plana (à direita) de mesmas dimensões (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A aplicação do modelo de Fraunhofer/Fourier requer que ondas planas se propaguem nos poços. Conseqüentemente, o limite superior de freqüência,  $f_{\max}$ , para que o espalhamento siga as predições do modelo requer que a largura  $w$  dos poços seja dada por

$$w = \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}}.$$

Acima de  $f_{\max}$  o espalhamento continuará a ocorrer pois se trata de uma estrutura com geometria complexa. Portanto,  $f_{\max}$  é apenas um limite de aplicabilidade da teoria, e não para ocorrência de espalhamento.

O modelo de ondas planas explica a necessidade de aletas separando os diferentes poços. O espalhamento não seguirá os resultados do modelo simplificado na ausência das aletas. Estas, por sua vez, devem ter a menor espessura possível, garantindo porém que não vibrem, o que poderá ocasionar perdas de energia.

Uma seqüência de resíduos quadráticos é a seqüência numérica mais comumente utilizada na determinação da profundidade dos poços dos difusores de Schroeder. Esta seqüência é obtida por meio de

$$s_n = n^2 \text{ modulo } N$$

onde *modulo* indica o resto não negativo,  $N$  é o número primo gerador da seqüência, e que dá também o número de poços, e  $n = 0, 1, \dots, N-1$ , é o número de ordem do poço.



Por exemplo, para o número primo  $N = 7$ , e para  $n = 5$ , a profundidade do sexto poço será dada por  $s_5 = 5^2 \bmod 7 = 25 \bmod 7$ . O *modulo7* significa que 7 é subtraído de 25 até que se obtenha resto não negativo. Em palavras, 7 é subtraído de 25 três vezes com resto 4. A profundidade do sexto poço seria então proporcional ao numeral 4. A seqüência gerada com  $N = 7$  seria então  $S_7 = \{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ . A Figura 26 apresenta um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23. A Figura 26 apresenta um quadro com seqüências de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23.

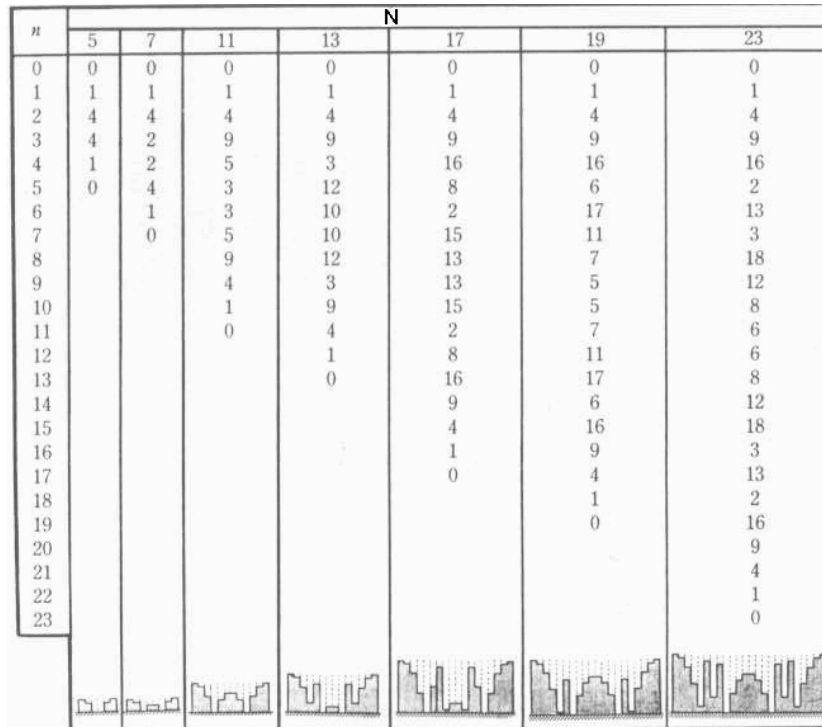


Figura 26: Seqüência de resíduos quadráticos para os números primos de 5 a 23. O perfil do difusor encontra-se ilustrado no rodapé de cada coluna, onde a profundidade de cada poço é proporcional à seqüência de números da respectiva coluna (Fonte: F.A. Everest [12]).

Os difusores de Schroeder atuam em freqüências múltiplas da *freqüência de projeto*. A freqüência de projeto é normalmente tomada como o limite inferior de atuação do difusor,  $f_{\min}$ . A profundidade do  $n$ -ésimo poço,  $d_n$ , é então determinada a partir da seqüência por meio da seguinte fórmula

$$d_n = \frac{S_n \lambda_{\max}}{2N}, \quad \text{onde} \quad \lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}}.$$

A freqüência de projeto não é a menor freqüência na qual o difusor gera mais espalhamento do que uma superfície plana, sendo apenas a menor freqüência onde a difração se dá ainda na forma de lóbulos de mesma energia. Difusores de Schroeder espalham diferentemente de superfícies planas uma ou duas oitavas abaixo da freqüência de projeto.

Os lóbulos de mesma energia aparecem no campo afastado em posições angulares  $\theta$  dadas por

$$\text{sen}(\theta) = \frac{m\lambda}{Nw} - \text{sen}(\psi), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

onde  $m$  é o número de ordem do lóbulo.

Quando este resultado é substituído na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, na freqüência de projeto, a seguinte expressão para a pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo

$$|p_m| \approx \left| A \int_S R(x) e^{j2\pi x m / Nw} dx \right| = \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi x m / N} \right|$$

Para uma seqüência de resíduos quadráticos, a amplitude da pressão nos lóbulos será a mesma e dada por

$$|p_m| \propto \sqrt{N}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

## 12. PERIODICIDADE

Uma seqüência completa determina um *período* do difusor. A Figura 27 ilustra 2 períodos (e como dois períodos adjacentes se combinam) de um difusor de resíduos quadráticos baseado no número primo 17.

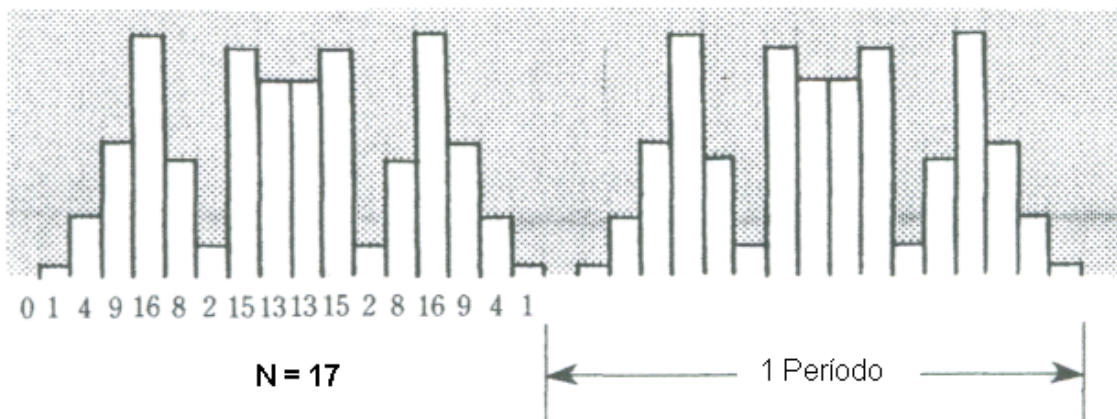


Figura 27 Dois períodos de um difusor de resíduos quadráticos gerado com o número primo 17 (Fonte: F.A. Everest [12]).

O comprimento do período,  $Nw$ , é freqüentemente determinante do desempenho do difusor. Quando muito estreito, então, na freqüência de projeto, haverá somente um grande lóbulo na resposta polar. Uma outra conseqüência do período estreito, é que nas primeiras freqüências múltiplas da freqüência de projeto, o difusor se comporta como uma superfície plana. Este comportamento é ilustrado na Figura 28, a qual apresenta o espalhamento gerado por difusores com períodos de diferentes comprimentos. Ambos são QRDs com  $N = 7$ , e freqüência de projeto de 500 Hz. A largura  $w$  dos poços é de 3 e 9 cm, o que fornece períodos com comprimento de 21 e 63 cm, respectivamente. Para uma comparação honesta, foi de 3 o número de períodos do difusor com menor largura de poço, de tal forma que a largura total dos dois difusores fosse a mesma e igual a 63 cm. Para o difusor com largura de poços mais estreita, à direita da figura, o limite inferior de espalhamento é determinado pelo comprimento do período e não pela maior profundidade de poço, pois, em 1kHz, o desempenho deste difusor é praticamente o mesmo de uma superfície plana de mesmas dimensões.

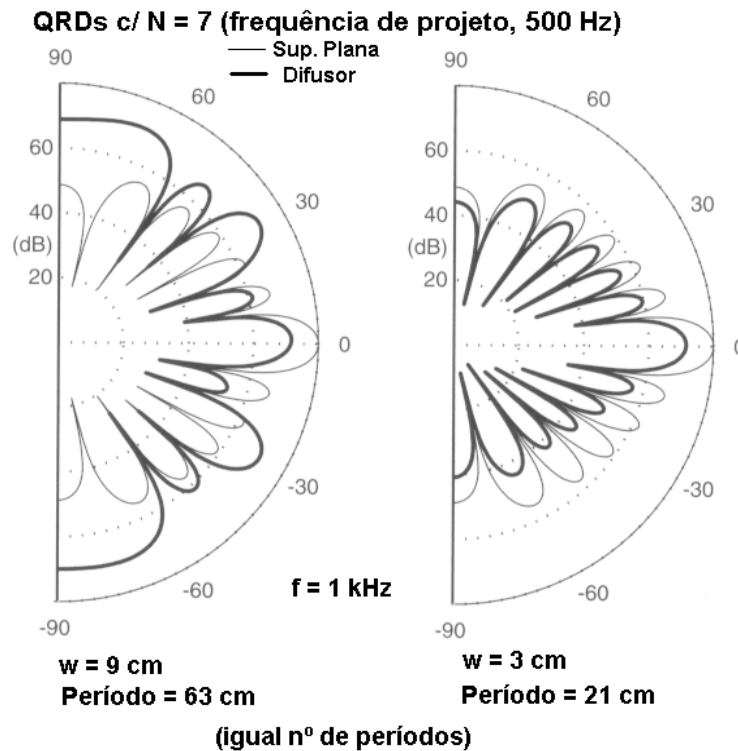


Figura 28: Diagramas polares em 1 kHz de dois QRDs com  $N=7$ , de mesma largura total e frequência de projeto de 500 Hz, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

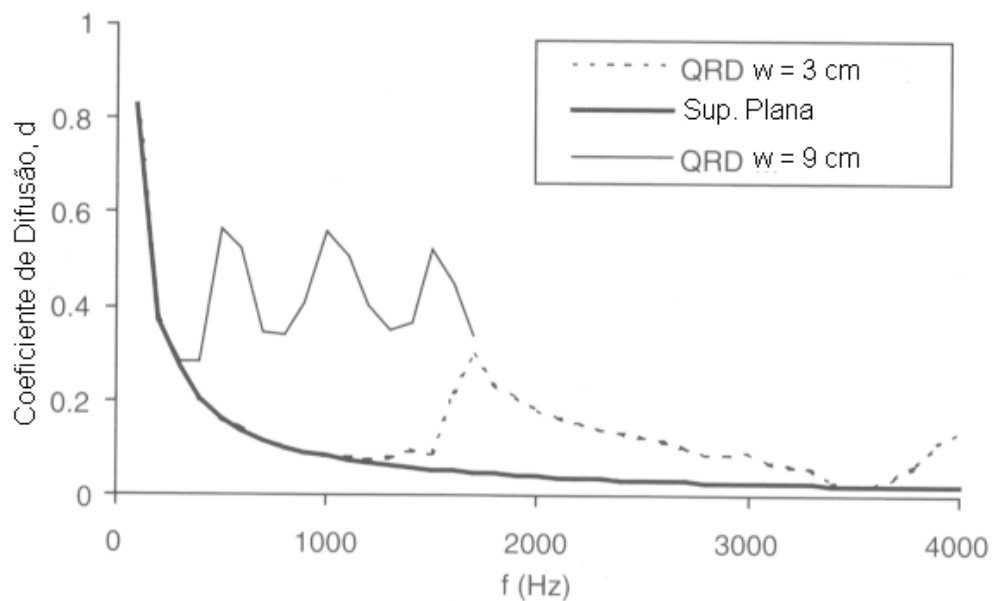


Figura 29: Variação do coeficiente de difusão de dois QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. A frequência de projeto dos dois difusores é 500 Hz (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A Figura 29 apresenta a variação do coeficiente de difusão destes QRDs em função da frequência, comparativamente com uma superfície plana de mesmas dimensões. O QRD com largura de poços mais estreita só começa a espalhar mais do que a superfície plana a partir de 1,5 kHz — três vezes a frequência de projeto. Esta é aproximadamente a frequência onde aparece o primeiro lóbulo lateral na resposta polar, e portanto é a frequência a partir da qual um espalhamento mais significativo em direções oblíquas começa a ocorrer. Já para o QRD com maior largura de poços, o primeiro lóbulo lateral na resposta polar aparece abaixo da frequência de projeto e portanto espalhamento significativo já começa a ocorrer a partir da frequência de projeto de 500 Hz.

### 13. OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE QRDS

Para que um QRD desempenhe otimamente, deverá haver periodicidade. Os lóbulos são gerados pela periodicidade da superfície. Sem periodicidade, tudo o que as fórmulas de projeto garantem é o mesmo nível de espalhamento em certas direções. Este fato é ilustrado na Figura 30, que compara o espalhamento gerado por um difusor com diferentes períodos, onde se encontram indicadas as direções que apresentam níveis similares de espalhamento. Observa-se nesta figura que os lóbulos laterais se estreitam à medida que o número de períodos aumenta, o que gera espalhamento irregular, pois há um grande número de posições angulares sem espalhamento. Assim, um projeto otimizado é aquele que atenda aos seguintes requisitos básicos:

- Um número relativamente pequeno de períodos, em torno de 5, para garantir a periodicidade necessária, e com lóbulos de difração não muito estreitos.
- Período de grande comprimento para assegurar um grande número de lóbulos laterais, o que implica num valor de  $N$  relativamente grande, o que é preferível, pois largura de poços  $w$  grande pode produzir reflexões especulares em altas frequências.
- Pode parecer que a largura de poços  $w$  deva ser a menor possível para que o difusor cubra uma ampla faixa de frequências. Porém, há outras considerações que limitam a estreiteza dos poços: 1) custo e dificuldade de fabricação e 2) absorção devido a efeitos viscosos. Conseqüentemente a recomendação é adotar a largura dos poços  $w$  entre 2,5 e 5 cm.
- Normalmente, por questões de espaço, é de interesse limitar a profundidade dos poços do difusor. Para uma dada profundidade máxima,  $d_{max}$ , a frequência mínima de atuação do QRD,  $f_{min}$ , (frequência de projeto), é dada por  $f_{min} = cS_{max} / 2Nd_{max}$ . Então a razão entre o maior número da seqüência,  $S_{max}$ , e o número primo gerador da seqüência,  $N$ ; ou seja  $S_{max} / N$ , determina o limite de baixa frequência de atuação do QRD. Por exemplo:  $N = 7$ ,  $S_{max} / N = 4/7$ ;  $N = 13$ ,  $S_{max} / N = 12/13$ . Conseqüentemente, um QRD com  $N = 7$ , fornecerá um limite de baixa frequência aproximadamente uma oitava abaixo do QRD com  $N = 13$ . No sentido de reduzir este limite mantendo  $N$  grande, o que é desejável, é possível manipular a seqüência, introduzido um deslocamento de fase constante,  $m$ , na fórmula recursiva; ou seja:

$$s_n = (n^2 + m) \bmod uoN, m \text{ inteiro constante.}$$

Considerando dois QRDS com  $N = 13$ , obtém-se:

$$m = 0, s_n = \{0,1,4,9,3,12,10,10,12,3,9,4,1\}, S_{max} / N = 12/13,$$

$$m = 4, s_n = \{4,5,8,0,7,3,1,1,3,7,0,8,5\}, S_{max} / N = 8/13.$$

Conseqüentemente, a frequência de projeto foi rebaixada de  $1/3$  com a introdução da fase  $m$ . No entanto, convém lembrar que esta melhoria de desempenho em baixas frequências poderá não ocorrer caso o comprimento do período seja curto.

- Nas *frequências críticas* dadas por  $mNf_{min}$ , com  $m = 1, 2, 3$ , etc., o QRD se comporta como uma superfície plana pois os poços irradiam em fase nestas frequências. Estas são frequências para as quais os comprimentos de onda são múltiplos inteiros da frequência de projeto. A Figura 30 mostra o espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz, quando o QRD se comporta como uma superfície plana. A fim de evitar-se estas frequências críticas, é necessário que a primeira frequência crítica esteja acima da frequência máxima de atuação do QRD, o que requer  $N \gg c / 2wf_{min}$ .

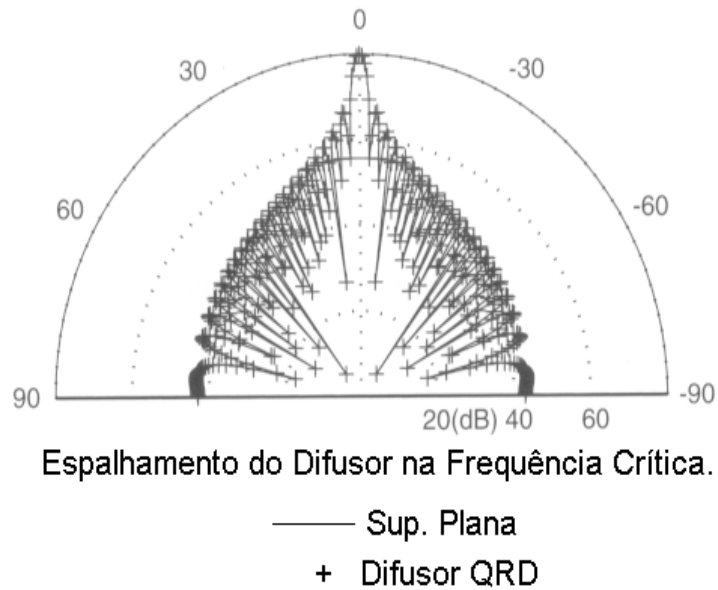


Figura 30: Espalhamento de um QRD na frequência crítica de 3,5 kHz (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

## 14. OUTRAS SEQUÊNCIAS

### 14.1. Seqüências de Comprimento Máximo, MLS

Schroeder [13] iniciou seus trabalhos na área de difusores estudando o espalhamento com a seqüência de comprimento máximo MLS ("maximum-length sequence"). Um sinal MLS é um sinal aparentemente aleatório, obtido de certas seqüências binárias compostas de 0 e 1. O sinal MLS é utilizado na criação de ruído pseudo-aleatório e apresenta espectro de potência plano. Esta característica é que torna a MLS atraente na geração de perfis de difusores.

Uma MLS de ordem  $n$  é periódica com período  $N$  dado por  $N = 2^n - 1$ . Existem diferentes MLS de mesma ordem. A Figura 31 ilustra a seção transversal de um difusor formado com uma MLS com período  $N = 7$ , por meio da seqüência  $\{1, 1, 0, 1, 0, 0, 0\}$ .

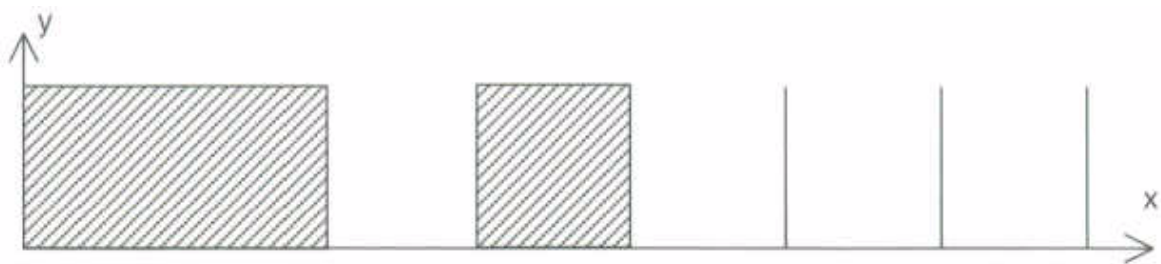


Figura 31: Seção transversal de um difusor formado com seqüência de comprimento máximo, MLS, com período  $N = 7$  (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

Quando, na frequência de projeto, a profundidade dos poços é igual a  $1/4$  do comprimento de onda, os coeficientes de reflexão  $R_n$  serão  $\{1, 1, -1, 1, -1, -1, -1\}$ . Substituindo estes coeficientes de reflexão na solução de Fraunhofer/Fourier, resulta, para a pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo

$$|p_m| \approx \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| = A, \quad m = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$$

$$= A\sqrt{N+1}, \quad \text{outros casos.}$$

Ou seja, os lóbulos laterais ( $|m| > 0$  &  $|m| < N$ ) têm o mesmo nível, sendo que o lóbulo principal de ordem zero ( $m = 0$ ) está desnivelado de  $-10\log(N+1)$ . A Figura 32 apresenta o espalhamento, na frequência de projeto (profundidade do poço igual a  $1/4$  do comprimento de onda nesta frequência), de um difusor MLS com período  $N = 7$  comparativamente com uma superfície plana. Na frequência de projeto, se formam 5 lóbulos, com o lóbulo central desnivelado de  $-10\log(8) = -9$  dB. Uma oitava acima da frequência de projeto, quando o comprimento de onda é igual à metade da profundidade do poço, o difusor se comporta como uma superfície plana, com todas as ondas sendo irradiadas com a mesma fase, sendo então esta a frequência crítica do difusor. Conseqüentemente, o difusor MLS só é útil numa banda de oitava. Esta é uma limitação do difusor MLS.

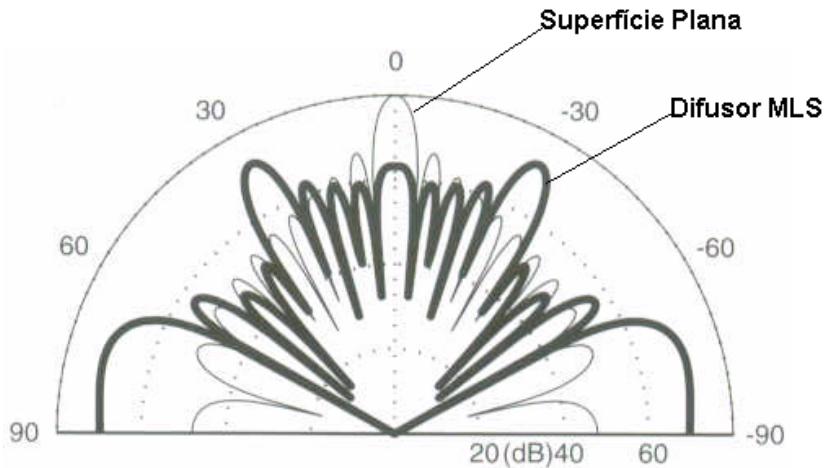


Figura 32: Espalhamento, na frequência de projeto, de um difusor MLS com 5 períodos e com  $N = 7$ , comparativamente com uma superfície plana (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

### 14.2. Seqüências de Raízes Primitivas

A seqüência de raiz primitiva (“primitive-root sequence”) é obtida por meio de

$$s_n = r^n \text{ modulo } N, \quad n = 1, 2, \dots, N-1$$

onde *modulo* indica o resto não negativo,  $N$  é o número primo gerador da seqüência,  $r$  é a menor raiz primitiva de  $N$ , sendo que o difusor terá  $N - 1$  poços.

Uma raiz primitiva é aquela para a qual a seqüência  $S_n$  gerada é única. Por exemplo  $N = 7$  tem 3 como raiz primitiva, e assim  $S_n = \{3, 2, 6, 4, 5, 1\}$ , que é uma seqüência que contém todos os inteiros entre 1 e  $N - 1$ .

O difusor perfilado com base numa seqüência de raízes primitivas (“primitive-root difusor” PRD), tem como característica a redução da energia refletida na direção especular, além é claro, de gerar lóbulos de mesma energia em outras direções. Assim como ocorre com o QRD, o PRD apresenta estas características em frequências múltiplas da frequência de projeto. Nestas frequências, a amplitude do som refletido na direção especular é reduzida de  $20\log(N-1)$  com relação à superfície plana. Deve-se observar no entanto, que qualquer superfície com poços, reduz a energia refletida na direção especular, contanto que a profundidade dos poços seja da ordem de grandeza do comprimento de onda na frequência de interesse. Quando uma seqüência de profundidades é introduzida na superfície, ocorre interferência destrutiva entre as ondas irradiadas pelos poços.

A reflexão especular de um PRD se reduz à medida que  $N$  aumenta. Este fato é demonstrado na Figura 33 onde se compara o campo espalhado de dois PRDs com uma superfície plana. Um grande número de poços, entre 20 e 30, é necessário para que uma redução significativa comece a ocorrer na direção da reflexão especular.

A pressão sonora espalhada no  $m$ -ésimo lóbulo é aproximadamente dada por

$$|p_m| \approx \left| A \sum_{n=1}^N R_n e^{j2\pi nm/N} \right| = A, \quad m = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$$

$$= A\sqrt{N}, \quad \text{outros casos.}$$

### 14.3. DIFUSORES MULTIDIMENSIONAIS

Os difusores apresentados até aqui foram do tipo de único plano, ou difusores 1D. Estes difusores geram espalhamento em um hemi-disco, se comportando como superfícies planas em direções ortogonais. Embora estes difusores sejam os mais comuns, em certas situações há necessidade de se recorrer a difusores que gerem espalhamento hemisférico. Estes difusores podem ser formados combinando um difusor de Schroeder da direção x, com outro na direção y, e portanto haverá lóbulos de mesma energia em uma hemisfera. A Figura 34 apresenta um exemplo de uma superfície assim formada.

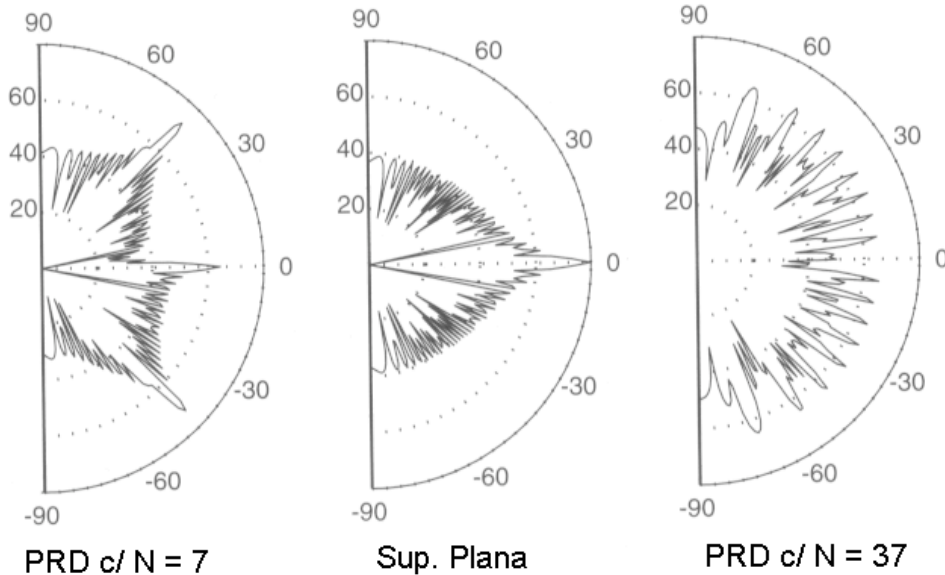


Figura 33: Espalhamento de dois PRDs e de superfície plana (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

O difusor 2D produz espalhamento em diversos planos. Um difusor 2D de dimensões  $Nw \times Nw$  tem o quadrado do número de lóbulos do difusor 1D de comprimento  $Nw$ . Ocorrerá porém, redução de energia dos lóbulos do difusor 2D de  $10 \log(m)$  quando comparado com o difusor 1D com  $m$  lóbulos.

A seqüência para formação de um QRD em 2D é dada por

$$s_{n,m} = (n^2 + m^2) \bmod uloN$$

onde  $n$  e  $m$  são inteiros, e que fornecem a profundidade do poço de ordem  $(n, m)$ .

Similarmente, um PRD em 2D poderá ser formado por meio da seqüência

$$s_{n,m} = (r^n + r^m) \bmod uloN.$$

É também possível adotar uma seqüência de resíduos quadráticos em uma direção e uma seqüência de raízes primitivas na direção ortogonal, contanto que ambas sejam geradas pelo mesmo número primo  $N$ , muito embora não tenham ainda sido reveladas as vantagens deste procedimento.

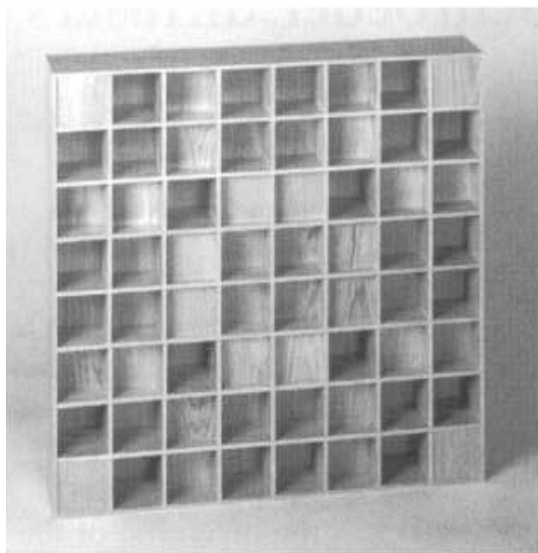


Figura 34: Difusor de Schroeder em 2D.

A versão 2D de um QRD com  $(2 \times 2)$  períodos, baseado em  $N = 7$ , é apresentada na Figura 35. Nesta concepção, os índices  $n$  e  $m$  iniciaram-se em 4, com objetivo de colocar o 0 no centro de cada período. Como a seqüência é periódica, é possível iniciar os índices  $n$  e  $m$  a partir de qualquer número da seqüência. Difusores 2D geralmente apresentam menor eficiência em baixas freqüências quando comparados com difusores 1D, pois a razão  $s_{\max} / N$  tende a 1 nos dispositivos 2D.

O difusor da Figura 35 também ilustra o fato que diferentes ordenamentos podem ser utilizados com os números da seqüência. A seguinte seqüência aparece na diagonal do período  $(1, 1)$  do difusor  $\{4, 1, 2, 0, 1, 1, 4\}$ , enquanto que a seqüência original é  $\{0, 1, 4, 2, 2, 4, 1\}$ . Observa-se que foram utilizados nesta diagonal, cada quarto elemento da seqüência original. Esta nova seqüência tem as mesmas propriedades de Fourier da seqüência original, devido à *propriedade de deslocamento* ("shift property") das seqüências de resíduo quadrático. Isto implica em boa difusão não somente em direções ortogonais, como também nas direções das diagonais do difusor.

4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6	6	6	1	5	4	5	1
4	6	3	2	3	6	4	4	4	6	3	2	3	6
4	6	3	2	3	6	4	4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6	6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2	2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3	3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6	6	6	1	5	4	5	1

Figura 35: QRD em 2D, com  $N = 7$  e  $(2 \times 2)$  períodos, com destaque de um dos períodos (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

A Figura 36 apresenta o espalhamento hemisférico, na freqüência igual a quatro vezes a freqüência de projeto, de um QRD em 2D com  $N = 7$ , comparativamente com uma superfície plana. O espalhamento hemisférico da superfície plana é conhecido como "banana polar".

Finalmente cabe tentar elucidar a contradição de projetar-se e avaliar-se as características do espalhamento de difusores no campo afastado, quando os ouvintes estão normalmente no campo próximo do difusor. Esta abordagem não é tão limitadora como aparenta ser, pois há evidências de



que um difusor capaz de criar boa dispersão no campo afastado, também o fará no campo próximo. No campo próximo, as diferenças de trajetórias de diferentes pontos da superfície até o observador controlam o espalhamento, fazendo com que apareçam um grande número de mínimos e máximos na resposta polar. Em realidade, os diagramas polares no campo próximo de diferentes difusores apresentam características estatísticas similares. Alguns estudos compararam difusores com arranjos periódicos e aperiódicos, tanto subjetiva como objetivamente, usando ouvintes em posições realistas no campo próximo. Observou-se então que os arranjos aperiódicos, que geram mais dispersão no campo afastado do que os arranjos periódicos, se mostraram difusores mais eficientes no campo próximo. Conseqüentemente, assume-se que difusores de Schroeder, que criam boa dispersão no campo afastado, serão também eficazes no campo próximo.

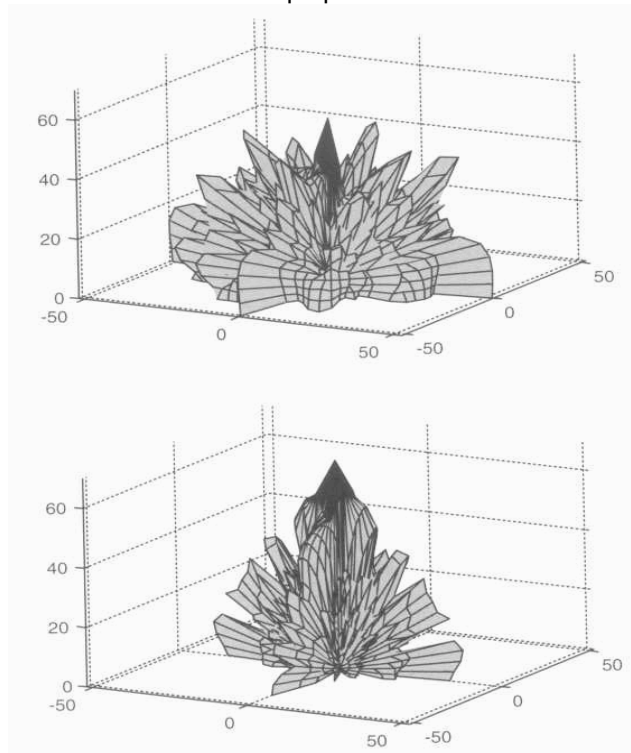


Figura 36: Empalhamento de difusor QRD em 2D com  $N = 7$  (em cima), comparativamente com uma superfície plana (embaixo) (Fonte: T.J. Cox e P. D'Antonio [4]).

## 15. DIFUSÃO NAS SALAS MODERNAS

A Figura 37 apresenta algumas salas modernas, com destaque para o tratamento de difusão sonora.

- **Beethovenhalle**, Bonn, 1959, TR 1,7 s (*arquiteto S. Wolske; consultores acústicos Meyer e Kuttruff*). Tratamento de difusão no teto por meio de uma densa combinação de hemisferas, pirâmides e cilindros truncados, projetando-se em torno de 30 cm. Paredes laterais recobertas com cilindros verticais atrás de telas acusticamente transparentes. Sala com o mais explícito tratamento de difusão, o que gerou absorção indesejada e o um tempo de reverberação de apenas 1,7 s.
- **Phillharmonie**, Berlin, 1963, TR 2,0 s (*arquiteto H. Scharoun; consultor acústico Cremer*). Sala com terraços ("vineyard terraces"), que oferecem muitos planos refletoras. O teto cilíndrico em forma de tenda, e difusores piramidais nas partes mais baixas do teto promovem a necessária difusão. As pirâmides possuem aberturas de tal forma a funcionarem também como ressoadores de Helmholtz, a fim de limitar a reverberação de baixa frequência.
- **Neues Gewandhaus**, Leipzig, 1981, TR 2,0 s. Substituto do aclamado Gewandhaus original, bombardeado num raid aéreo em 1944. O novo Gewandhaus, com terraços, tem teto formado por painéis difusores cilíndricos.
- **Michael Fowler Centre**, Wellington, 1983, TR 2,0 s (*arquitetos Warren e Mahoney; consultores acústicos Marshal e Hyde*). Esta foi a primeira sala a usar difusores de Schroeder (QRDs) nos painéis do teto e parte superior das paredes. Estudos subjetivos indicavam que a difusão se torna

efetiva subjetivamente a partir dos 350 Hz, aproximadamente. Daí então a frequência de projeto de 500 Hz dos difusores utilizados nesta sala.

- **Kyoto Concert Hall**, Kyoto, 1995, TR 2,0 s. (*arquiteto Arata Isozaki Atelier, consultoria acústica Nagata Acoustics*). Projetado como um “shoe-box” típico, com teto e parte inferior das paredes revestidas com elementos difusores testados na escala de 1:10.
- **Walt Disney Concert Hall**, Los Angeles, 2003, TR 2,0 s. (*arquiteto Frank O.Gehry, consultoria acústica Nagata Acoustics*). Com um custo final de US\$ 274 milhões, o prédio que abriga esta sala é todo em aço inoxidável. Sala com tetos formados por grandes superfícies convexas, o que confere alta difusão devido às boas características de espalhamento de grandes superfícies cilíndricas.



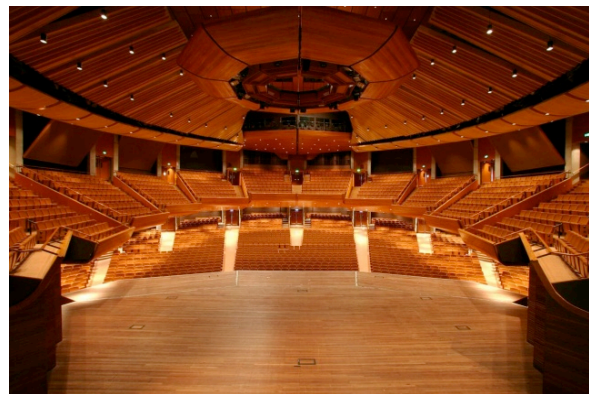
**Beethovenhalle**, Bonn, 1959, TR 1,7 s.



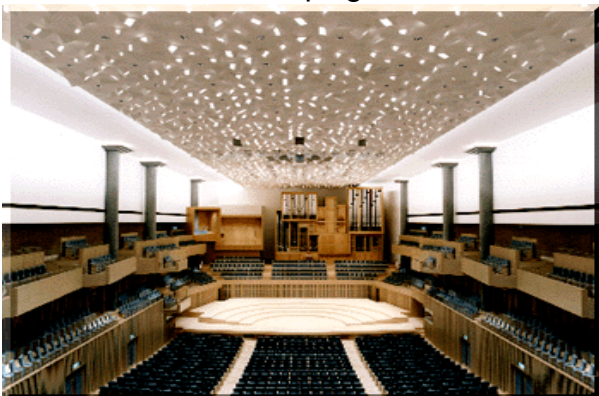
**Philharmonie**, Berlin, 1963, TR 2,0 s.



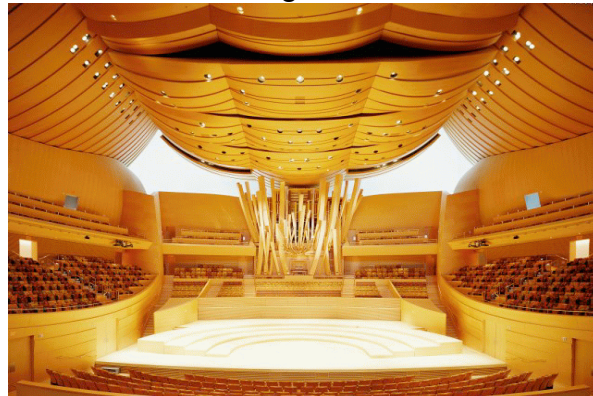
**N. Gewandhaus**, Leipzig, 1981, TR 2,0 s.



**M. Fowler**, Wellington, 1983, TR 2,0 s.



**Kyoto Concert Hall**, 1995, TR 2,0 s.



**W. Disney Hall**, LA, 2003, TR 2,0 s.

Figura 37: Algumas salas modernas com destaque para o tratamento de difusão sonora.

## 16. COMENTÁRIO FINAL

O estado da arte de difusores encontra-se atualmente em estágio bastante avançado. No entanto ainda relativamente pouco se sabe sobre os efeitos psicoacústicos da difusão, bem como até que ponto a qualidade acústica da sala dela depende.

## 17. REFERÊNCIAS

- [1] T. Yokota, S. Sakamoto and H. Tachibana, "Visualization of sound propagation and scattering in rooms", Institute of Industrial Science, University of Tokyo.
- [2] F.R. Fricke, "Visual assessments of the surface diffusion properties of concert halls", *Applied Acoustics*, **60**(2), 253-261, 2000.
- [3] AES-4id-2001, "AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – characterization and measurement of surface scattering uniformity", *J. Audio Eng. Soc.*, **49**(3), 149-165, 2001.
- [4] T.J. Cox and P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*, Spon Press, London, 2004.
- [5] E. Mommertz and M. Vorlander, "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients", *Applied Acoustics*, **60**(2), 187-199, 2000.
- [6] ISO 17497-1: Acoustics Measurement of the sound scattering properties of surfaces – Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room.
- [7] T.J. Hargreaves, T.J. Cox, Y.W. Lam and P. D'Antonio, "Surface diffusion coefficients for room acoustics: free field measures", *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**(4), 1710-1720, 2000.
- [8] J.Y. Jeon, S.C. Lee and M. Vorlander, "Development of scattering surfaces for concert halls", *Applied Acoustics*, **65**, 341-355, 2004.
- [9] T.J. Cox and P. D'Antonio, "Contrasting surface diffusion and scattering coefficients", *Proc. 17th ICA*, 6B.09.01, Italy, 2001.
- [10] T.J. Cox and P. D'Antonio, "Engineering art: the science of concert hall acoustics", *Interdisciplinary Science Reviews*, **26**(2), 119-129, 2003.
- [11] P. D'Antonio and T.J. Cox, "Diffusor applications in rooms", *Applied Acoustics*, **60**(2), 113-142, 2000.
- [12] F.A. Everest, *The Master Handbook of Acoustics*, TAB Books, Imprint of McGraw-Hill, New York, 1994.
- [13] M.R. Schroeder, "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences", *J. Acoust. Soc. Am.*, **57**(1), 149-150, 1975.

# ASPECTOS ACÚSTICOS, FISIOLÓGICOS E PERCEPTIVOS DA EXECUÇÃO E CONSTRUÇÃO DE INSTRUMENTOS DE SOPRO

**Leonardo Fuks**

Escola de Música da Universidade Federal do Rio de Janeiro

e-mail: cyclophonica@yahoo.com

Resumo: Este apresenta pesquisa interdisciplinar sobre geração sonora em instrumentos de sopro de palheta e voz, focalizando aspectos acústicos, fisiológicos e perceptivos.

Os estudos sobre instrumentos de palheta se concentram nas funções respiratórias e de sopro sob condições realísticas e possibilitam uma visão aprofundada nos parâmetros aerodinâmicos de entrada. Mediu-se a pressão de sopro em função do nível dinâmico e da frequência fundamental em profissionais do oboé, fagote, clarineta e saxofone alto, que se mostrou bastante sistemática, embora diferindo entre os instrumentos. O fluxo de ar em sons contínuos foi medido por espirometria indireta, utilizando-se palhetas com características extremas, uma consideravelmente rígida e outra flexível. As gravações foram realizadas em dois ambientes distintos, uma sala comum e uma câmara reverberante. Sons com níveis de vibrato intenso foram analisados no oboé, saxofone e fagote. Revelaram-se variações amplas na pressão de sopro, sugerindo que o principal fator de sua produção seja uma modulação rítmica na contração da musculatura respiratória, enquanto que as variações na frequência foram reduzidas, comparativamente ao canto e instrumentos de cordas.

A percepção de profissionais para a pressão intra-pulmonar foi analisada em um experimento psicofísico que mostrou relação aproximadamente linear entre pressões produzidas e percebidas. Movimentos respiratórios durante a execução foram medidos por técnica não-invasiva, pletismografia respiratória indutiva (RIP), que proporcionou dados confiáveis para a análise do desempenho. Os resultados revelaram em todos os músicos uma participação significativa da caixa torácica, além da parede abdominal em diversos sujeitos. O impacto das mudanças contínuas dos gases oxigênio e carbônico no ar exalado durante a execução, sobre a frequência fundamental, foi predita pela teoria e comparada a dados experimentais. O efeito, menor que o devido à variação de temperatura, representa um fator de relevância na afinação dos instrumentos.

A partir destes estudos e combinando conhecimentos da arte de construção de instrumentos e da confecção de modelos em materiais de alta tecnologia, como compósitos e moldagem de alta resolução, assistidos por modelagem em computador, apresentaremos protótipos de instrumentos realizados e atualmente sob análise de performance.

## 1. INTRODUÇÃO

Na performance de instrumentos de sopro e no canto, o artista compartilha o ar metabólico vital com o instrumento de produção sonora. Numa perspectiva mais geral, as pausas respiratórias e mesmo os sons da respiração contribuem significativamente na interpretação, mesmo em instrumentos outros que os de sopro. Por exemplo, ao tocar instrumentos de arco, os executantes freqüentemente empregam os sons e os gestos da respiração para aumentar a expressividade e para melhor demarcar as frases musicais. Portanto, a respiração e suas respectivas pausas servem como elementos estruturais da performance musical, não raro possuindo um conteúdo estético.

Nesta palestra abordaremos o tema numa perspectiva interdisciplinar, incluindo aspectos musicais, acústicos, perceptivos e fisiológicos. Buscamos nos concentrar em instrumentos de sopro com palheta, que abrangem o oboé, a clarineta, o saxofone e o fagote. Esta abordagem interdisciplinar é justificada por assumirmos não ser possível compreender completamente o processo de se tocar um instrumento de sopro se algum daqueles aspectos acima for excluído em sua análise.

## 2. PRESSÕES DE SOPRO EM FAGOTE, CLARINETA, OBOÉ E SAXOFONE

A pressão de sopro é um parâmetro central em instrumentos de palheta, conforme estudos prévios (Bouhuys, 1964, 1968; Navrátil M & Rejsek K, 1968; Pawlowski & Zoltowski, 1985, 1987). Entretanto, a descrição detalhada das relações entre altura, pressão de sopro e nível dinâmico é algo raro. Alguns estudos anteriores documentam valores obtidos a partir de um grande número de executantes, incluindo profissionais e amadores, presumivelmente obscurecendo as dependências

entre aqueles parâmetros. O objetivo de determinados trabalhos era o de proporcionar valores típicos e máximos para aplicações clínicas. Nossa hipótese básica era de que há uma relação sistemática entre pressão de sopro e as propriedades acústicas do instrumento e dos sons produzidos.

Neste artigo (Fuks and Sundberg, 1996) foram registradas as pressões de sopro na boca de dois músicos profissionais de cada um dos quatro instrumentos de palheta: clarineta em si bemol, saxofone alto, oboé e fagote. Os sujeitos cumpriram três tarefas: (1) uma série de sons isolados a quatro níveis dinâmicos, (2) a mesma série com sons em crescendo-diminuendo, e (3) arpejos musicais ascendentes e descendentes tocados *legato* em quatro níveis dinâmicos (pp, mp, mf, ff).

Os resultados mostraram que, dentre cada instrumento, as pressões de sopro usadas pelos sujeitos guardavam relações semelhantes de acordo com a altura e nível dinâmico. As pressões variaram grandemente, segundo instrumento, nível dinâmico e altura da nota, num intervalo entre 15 e 120 cm H<sub>2</sub>O. Entre instrumentos distintos, diferenças evidentes foram encontradas com respeito à dependência com a altura dos sons. Cada tipo de instrumento apresentou curvas características, diferindo apenas discretamente entre os músicos.

A investigação utilizou sons *crescendo-diminuendo* e arpejos a níveis dinâmicos constantes. Poderíamos assumir que padrões semelhantes seriam encontrados para outras notas nos intervalos entre aquelas estudadas e que as pressões de sopro para notas intermediárias podem ser estimadas por interpolação. Entretanto, o dedilhado e a resposta do instrumento não necessariamente variam continuamente entre notas adjacentes, o que pode demandar valores diferentes de pressão.

Foi sugerido que as funções proprioceptivas do aparelho respiratório, responsáveis pela percepção de estímulos por receptores nervosos abdominais, torácicos e dos pulmões, são altamente relevantes para a performance musical. Este foi o principal tópico abordado no artigo descrito no Estudo V, abaixo.

Em instrumentos de palheta dupla, a pressão de sopro aumenta com a frequência fundamental e com o nível dinâmico. Na clarineta, a pressão tende a diminuir discretamente com a frequência fundamental, dentro de cada um dos dois registros, geralmente aumentando com o nível dinâmico. Já no saxofone, a pressão varia de forma semelhante às palhetas duplas no registro grave, e de forma mais próxima à da clarineta na região aguda.

### 3. PARÂMETROS AERODINÂMICOS DE ENTRADA E PROPRIEDADES SONORAS EM INSTRUMENTOS DE PALHETA

Foram realizadas medições do fluxo de ar, possibilitando a estimativa das demandas típicas de suprimento de ar representadas pelos diferentes instrumentos - oboé, saxofone alto, fagote e clarineta.

Os parâmetros de entrada aerodinâmicos em instrumentos de palheta foram medidos enquanto profissionais tocavam diferentes notas a três níveis dinâmicos diferentes. Duas palhetas foram usadas, uma julgada como muito resistente ao sopro e outra de muito fácil produção sonora. As palhetas contrastantes mostraram flagrantes diferenças em termos de vazão de ar, pressão de sopro e resistência aerodinâmica.

As tarefas consistiram em longos sons sustentados com e sem vibrato, enquanto que os sinais de áudio e de pressão de sopro eram registrados. As variações de volume pulmonar foram indiretamente medidas por um procedimento espirométrico, que também mostrou o consumo de ar médio, isto é, o fluxo médio de ar. Os sons foram produzidos em um laboratório, bem como numa câmara reverberante calibrada, possibilitando a estimativa da potência sonora irradiada. Valores médios para a resistência ao fluxo, potência aerodinâmica e eficiência mecânica foram computados. O fluxo de ar e potência mecânica de entrada variaram consideravelmente entre os instrumentos e entre os dois tipos extremos de palhetas, mas geralmente aumentaram com o nível sonoro. O fluxo de ar sistematicamente aumentou com a pressão de sopro e nível dinâmico em todos os instrumentos. As palhetas mais resistentes ao sopro exigiram maior fluxo de ar, maior pressão de sopro, e tenderam a produzir sons com maior nível de pressão sonora.

De acordo com estudos prévios, a relação pressão-fluxo de ar, em condições de embocadura com tensão constante, deveria corresponder a uma curva decrescente; desta forma, um aumento de pressão produziria uma diminuição de fluxo de ar e a uma queda no nível de intensidade sonora. Nossos resultados mostraram que um aumento na pressão de sopro sempre estava associado a aumento no fluxo de ar e no nível de intensidade sonora. Esta aparente discrepância sugere que o instrumentista necessita, na prática, reduzir a tensão na embocadura para fazer um *crescendo*.

O vibrato pode ser gerado através de diversos mecanismos. A investigação focalizou um vibrato intenso, claramente notado. Para tal efeito no oboé, fagote e saxofone, foram observadas amplas variações na pressão de sopro, em média  $\pm 10$  cmH<sub>2</sub>O, atingindo até  $\pm 20$  cmH<sub>2</sub>O em alguns

casos. Estas grandes oscilações não podem ser produzidas apenas pelo mecanismo laríngeo, conforme defendido por estudos anteriores (Weait, 1979; Gärtner, 1973), mas requerem a participação de forças expiratórias.

### **4. PREDIÇÃO E MEDIÇÃO DOS EFEITOS DO AR EXALADO SOBRE A AFINAÇÃO**

É sabido que um instrumento de sopro sofre aumento em frequência de afinação à medida em que é aquecido da temperatura ambiente até a temperatura de equilíbrio com o ar pulmonar, geralmente atingindo valores entre 25.6 e 26.8 °C . Isto se dá devido ao fato de que a velocidade do som aumenta com a raiz quadrada da temperatura, e que a frequência sonora é proporcional à velocidade do som na coluna de ar do instrumento.

Este estudo (Fuks, 1996, 1997) abordou o efeito da variação contínua das percentagens de gás carbônico e oxigênio no ar expirado sobre a afinação dos instrumentos de palheta, excluindo-se o efeito de temperatura. Foram usados dispositivos eletrônicos (capnômetro e oxímetro) para a medição precisa da percentagem daqueles gases durante a execução de notas longas e trechos musicais. Observamos variações na concentração de gás carbônico, que normalmente se inicia na faixa de 2.5-3% , e atingiu mais do que 8.5% em casos extremos de frases longas. A percentagem de gás oxigênio, geralmente iniciada em 21%, caiu para menos de 11% em certos casos. O efeito combinado destas duas variações foi previsto pela teoria física e comparado com as variações ocorridas no registro sonoro, em condições controladas em laboratório. Foi assumido que a umidade do ar não sofresse variações durante o experimento.

As discrepâncias ocorridas entre a predição teórica e os resultados experimentais puderam ser explicadas por variações na umidade do ar entre o início da expiração e o prolongamento da execução instrumental. Foi demonstrado que as variações nas proporções gasosas no ar podem contribuir para uma queda de até 13 centésimos de semi-tom (ou 13 cents) na afinação, a cada ciclo ventilatório. Isto significa que se um oboísta atacar um lá fundamental com frequência de 440 Hz, tendo recentemente tomado ar fresco, após alguns segundos de som contínuo a afinação tenderá a cair para até 436.5 Hz. Isto terá ocorrido apenas devido às modificações na composição do ar pulmonar, com as outras condições permanecendo constantes. Portanto, trata-se de um fator relevante para a performance musical, embora se possa supor que o músico treinado venha a compensar este efeito por meio do controle de pressão de ar e de embocadura.

### **5. MEDIÇÃO DOS MOVIMENTOS RESPIRATÓRIOS EM PROFISSIONAIS DE INSTRUMENTOS DE PALHETA USANDO RIP**

A técnica de Pletismografia Indutiva Respiratória, RIP-Respiratory Inductive Plethysmography- é uma técnica desenvolvida para a monitoração respiratória clínica, tendo sido introduzida na década de 70 e ainda em uso devido a seu relativo baixo custo, confiabilidade, robustez e por representar uma técnica não-invasiva para o paciente, geralmente situado no leito hospitalar. A técnica é baseada na auto-indutância de duas bobinas, conectadas a um oscilador de alta frequência, e que envolvem o abdomen e o tórax na forma de duas cintas elásticas, não representando desconforto para o sujeito. As mudanças nas áreas de seção transversal do tronco devidas à ventilação pulmonar causam variações nas propriedades eletromagnéticas do sistema, que são detectadas pelo circuito do aparelho e traduzidas para variações volumétricas, segundo um processo de calibração adequado. Assim, as variações individuais em volume do tórax e do abdomen podem ser estimadas com certo grau de precisão e informar sobre as variações volumétricas nestes dois "compartimentos". De fato, este método já foi utilizado com sucesso para a análise de movimentos respiratórios em cantores líricos (Thomasson and Sundberg, 1997), podendo auxiliar na resposta a certas questões objetivas relativas à técnica de execução em instrumentos de sopro e canto.

O método foi aplicado em oito músicos profissionais dos quatro instrumentos de palheta, que cumpriram diversas manobras respiratórias para a calibração e tarefas musicais como arpejos, escalas e execução de melodias padronizadas (Fuks and Sundberg, 1998a; 1998b). Ele forneceu precisão aceitável para a medição dos volumes pulmonares, movimentos relativos entre tórax e abdomen, assim como revelou detalhes temporais e cinemáticos ocorridos nas breves pausas respiratórias.

Os grupos respiratórios de todos os sujeitos foram iniciados a 55% - 87% e terminados entre 14% - 52% da capacidade vital pulmonar dos músicos, dependendo do instrumento, peça tocada e duração da frase musical. Os executantes geralmente mostraram contribuições simultâneas e, em

diversos casos, igualmente importantes das partes abdominal e torácica durante as tarefas. Estes achados freqüentemente contrastavam com as idéias dos músicos sobre como utilizavam seu próprio aparelho respiratório. A respeito das pausas respiratórias, elas corresponderam a tempos de inalação extremos de aproximadamente 300 milissegundos, bem sincronizadas com os sinais de áudio.

## 6. PERCEPÇÃO DA PRESSÃO DE SOPRO

Este estudo (Fuks, 1998c) utilizou um método de produção psicofísico para a avaliação direta da percepção da pressão gerada internamente pelos instrumentistas de sopro. Seu principal objetivo era o de medir como os músicos julgavam a pressão pulmonar, independentemente das condições normais de execução, isto é, sem esforço de embocadura, vibração da palheta, fluxo de ar ou retorno auditivo. Com esta informação, poderíamos saber se as pressões sistemáticas observadas no estudo I (Fuks and Sundberg, 1996) eram absolutamente dependentes de feedback sensorial proporcionado pelo instrumento ou se poderiam ser devidas a capacidades proprioceptivas respiratórias.

Aos músicos foi solicitada a produção de pressões pulmonares correspondentes a números que lhes eram ditados de forma aleatória. Estes números poderiam corresponder à percepção de 1, 2 ou 4 vezes a pressão de referência, definida por um determinado volume pulmonar inicial. As pressões na boca eram continuamente medidas com um manômetro eletrônico e comparadas com os números utilizados como comandos.

O método forneceu dados consistentes e interessantes sobre esta modalidade perceptiva raramente estudada. A análise de regressão utilizou diversos modelos matemáticos de ajuste de dados- linear, logarítmico, exponencial e de potência- e revelou que o modelo linear apresentou as melhores correlações entre as pressões medidas e as percebidas. Linearidade não é geralmente encontrada em outras modalidades de percepção, como as de dinâmica e a de altura musicais.

## 7. CONSTRUINDO, RECONSTRUINDO E DESCONSTRUINDO INSTRUMENTOS DE SOPRO

Através dos estudos combinados da performance, acústica musical e da arte tradicional de construção de instrumentos, temos realizado protótipos de instrumentos convencionais e mesmo novos instrumentos. Utilizando técnicas como a cópia em silicone (Silicloning) e moldagem em materiais compósito de fibra de carbono, aramida e resinas, temos obtido uma coleção de cabeças de flauta moderna, oboés barrocos, flauto traverso, bocais de fagotes e boquilhas de clarineta, para utilização por profissionais e estudantes. Estes produtos tem sido avaliados e os resultados preliminares serão mostrados e discutidos.

Os novos produtos incluem a série de "Transmorphones", que são dispositivos baseados na obra do acústico Arthur Benade e permitem combinar os princípios acústicos de diversos instrumentos, originando híbridos de sopro.

Dentre eles: cabeça de flauta na clarineta; boquilha para flauta transversa; bocal de trompete no oboé; bocal de para saxofone; boquilha de palheta dupla para clarine

# NOVO SISTEMA PARA MEDIÇÕES ACÚSTICAS

**Swen Müller**

Laboratório de Ensaios Acústicos do INMETRO

e-mail: [smuller@inmetro.gov.br](mailto:smuller@inmetro.gov.br)

Resumo: Medições na área de acústica hoje em dia podem ser conduzidas facilmente com qualquer computador. Na maioria das vezes, as placas de som embutidas neles oferecem qualidade razoável, e como opção adicional, existem inúmeros conversores AD/DA externos com qualidade superior para gravações digitais. Porém, no dia-a-dia de medições, o usuário logo esbarra em dificuldades utilizando tais dispositivos comuns. Por exemplo, a captação de respostas impulsivas de salas requer, além do conversor AD/DA, um amplificador de potência e um pré-amplificador com fornecimento para os microfones. A fiação entre essas caixas é sujeita a erros e os níveis absolutos, cujo conhecimento é crucial para a elaboração de medições calibradas, difíceis a avaliar. Essas dificuldades e a falta de conforto levaram à concepção de um "frontend" de medições com todas as funções necessárias já embutidas: conversores AD/DA com conexão a desktops e notebooks, pré-amplificador com ganho chaveável em passos precisos, amplificador de potência eficiente e fonte universal chaveada. O controle de todas as funções é exercida pelo computador, o que facilita a obtenção de resultados corretos em todos os modos de operação, já que todos os ganhos ao longo do caminho do sinal sempre são conhecidos.

## 1. INTRODUÇÃO

Na área de metrologia, o que pode ser observado há algum tempo é uma integração cada vez maior do computador como peça central da instrumentação. Antigamente, os analisadores para propósitos específicos eram trambolhas caríssimos que só serviram para um único propósito. Com o surgimento dos microcomputadores, esses aparelhos passaram a ter interfaces embutidos para transferir os resultados dos ensaios ao computador, onde eles podem ser processados e preparados para a apresentação.

Hoje em dia, o poder de cálculos dos computadores é tamanho que o próprio processamento de sinais pode ser feito neles. Assim, com uma placa de conversores AD/DA, o computador pode se transformar num poderoso analisador que substituí equipamento dedicado, outrora caríssimo.

A tecnologia de medições de função de transferência com base em varreduras foi implementada exatamente desse jeito. Um programa que roda no PC gera e emite o sinal de excitação e capta a resposta do dispositivo a ser ensaiado, e em seguida executa todo o processamento necessário. Finalmente apresenta os resultados na tela ou os armazena no disco.

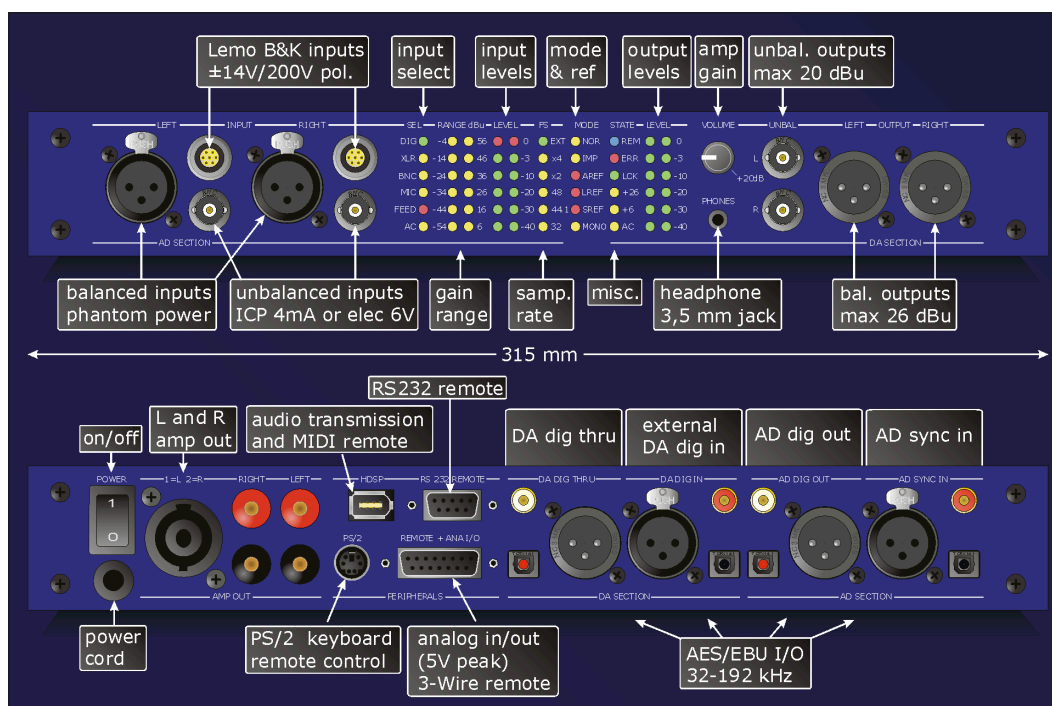


Figura 1: Painéis dianteiro e traseiro do sistema de medições (desenho).



Mas o âmbito das aplicações não se restringe só à avaliação de respostas em frequência de transdutores (microfones, alto-falantes, acelerômetros). Por exemplo, testes de inteligibilidade em escolas públicas executados pelo laboratório de acústica do INMETRO também foram conduzidas inteiramente desse jeito.

No entanto, a parafernália de equipamentos necessária para esses tipos de ensaio complica a execução dos mesmos. Adicionalmente, a fiação entre os aparelhos pode levar a erros, como já aconteceu várias vezes em ensaios cuja característica muitas vezes é a pressa com a qual eles têm que ser preparados e consumados. Tais ensaios sempre precisam de três componentes básicos, além dos microfones e alto-falantes:

- 1) Pré-amplificador de microfone e condicionador de sinais.
- 2) Amplificador de potência para fornecer o sinal de excitação ao alto-falante.
- 3) Analisador “stand-alone”, ou, no caso de processamento num computador como proposto aqui, placa com conversores AD/DA para tornar analógico o sinal de excitação gerado pelo computador, e simultaneamente digitalizar os sinais dos microfones.

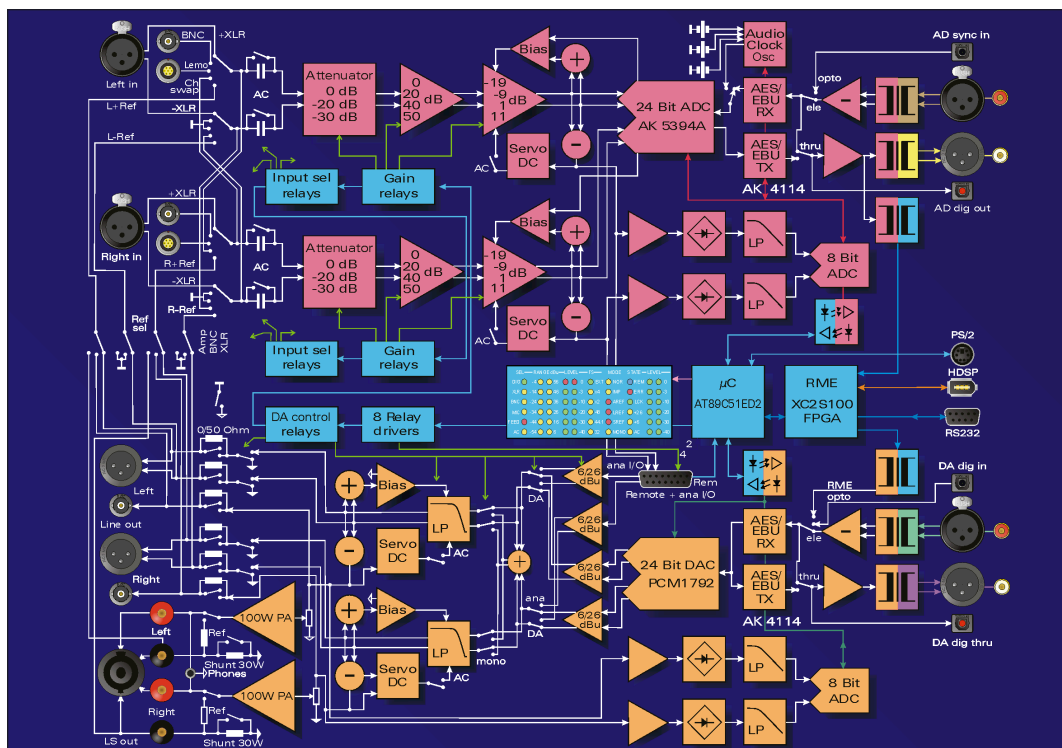


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema de medições

Foi assim que nasceu o desejo da disponibilidade de um único aparelho que integra todas as funções necessárias na área das medições acústicas e de vibrações e que permite a ligação direta de quaisquer microfones, acelerômetros, alto-falantes ou equipamentos de laboratório e de áudio profissional. Como exemplo, as Figura 3 e Figura 4 mostram um arranjo típico para medições em salas de aula para a avaliação da qualidade acústica das mesmas.

O arranjo na Figura 3 já conta com um condicionador de sinais especializado que integra a função de pré-amplificador de microfones e amplificador de potência para o fornecimento de energia ao alto-falante. No entanto, não contém conversores AD/DA para a ligação ao computador. Essa função é suprida por outro aparelho que é conectado ao computador mediante uma conexão de áudio digital padronizado, o chamado formato AES/EBU. O controle remoto do condicionador de sinais é realizado por uma ligação separada através da porta paralela do computador. Infelizmente, a qualidade do pré-amplificador não é suficiente para alguns tipos de ensaio e não permite a conexão de microfones de laboratório com voltagem de polarização de 200 V. Além disso, o amplificador de potência é fraco para muitos ensaios.

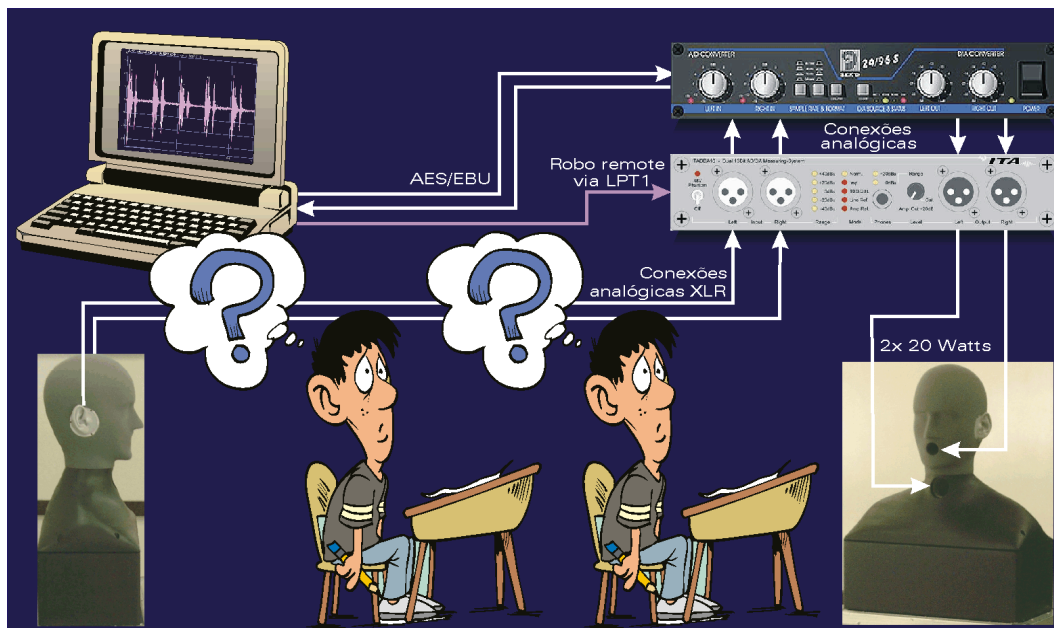


Figura 3: Arranjo para medições da inteligibilidade da palavra e das propriedades acústicas de salas de aula mediante equipamento já existente.

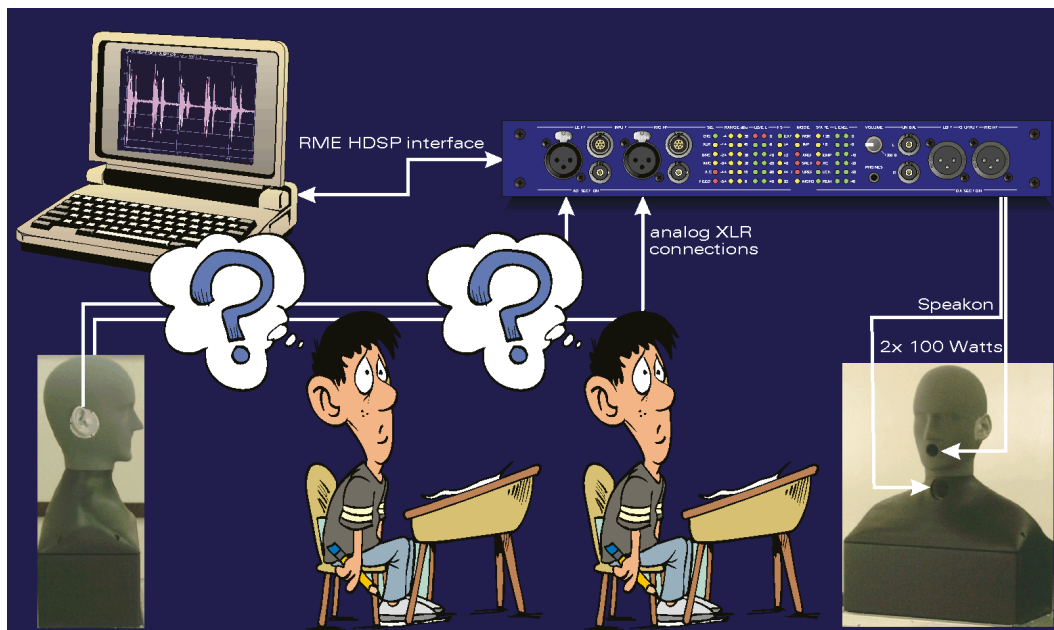


Figura 4: O arranjo como será com o novo sistema de medições proposto. Um único aparelho integra todas as funções necessárias para a execução da tarefa.

## 2. REQUISITOS DO NOVO SISTEMA SENDO DESENVOLVIDO

As desvantagens do equipamento datado levaram a uma série de requisitos a serem cumpridos por um novo sistema universal de medições na área de acústica. Este novo sistema a ser desenvolvido deve atender às necessidades de todas as três divisões do laboratório de Acústica do INMETRO e igualmente ter serventia para outras áreas de medições de áudio.

Segue uma lista de aplicações típicas em laboratórios de acústica e vibrações que poderão ser supridas inteiramente pelo novo sistema de medições:

- Medição do nível de pressão sonora e análise de quaisquer sinais acústicos.
- Medição da função de transferência de alto-falantes.
- Medição do coeficiente de absorção para incidência aleatória pelo método tradicional na câmara reverberante.
- Medição do coeficiente de absorção para incidência normal pelo método tradicional em tubo de impedância e pelo método in-situ aplicado pelo colega Paulo Massarani.

- Medição do isolamento de cabines, e em geral do isolamento entre quaisquer ambientes acústicos.
- Medição de respostas impulsivas de salas e avaliação do tempo de reverberação e dos parâmetros acústicos de quaisquer ambientes.
- Testes de inteligibilidade com gravação binaural simultânea.
- Medições da sensibilidade de microfones pelos métodos de comparação e de reciprocidade, em campo livre, campo de pressão ou em atuador eletrostático.
- Verificação de aparelhos audiométricos, medição do caminho acústico com mastóide.
- Medição da resposta em frequência de pré-amplificadores, medidores de pressão sonora, filtros e quaisquer outros dispositivos que processam sinais de áudio.
- Medição do ruído de fundo e da faixa dinâmica de amplificadores e outros equipamentos.
- Medição de potência acústica para a outorga do “Selo Ruído” a aparelhos eletrodomésticos.
- Medição da resposta em frequência de acelerômetros pelo método de comparação com *shaker*. Como a resposta abaixo da faixa de áudio é de interesse, o novo sistema deve ser capaz de lidar com frequências subsônicas, de preferência com opção de acoplamento DC.
- Medições de vibrações em materiais sólidos pelo método tradicional (análise FFT de dois canais) e pelo método de respostas impulsivas.
- Medição da resposta de caixas de som e sistemas de sonorização.
- Medição da diretividade de caixas de som com a ajuda de mesas giratórias.
- Medição da pressão sonora máxima de alto-falantes em função da frequência e do teor de distorção máximo estipulado.
- Medição simultânea da resposta em frequência e dos harmônicos de alto-falantes.
- Medição de distorção e intermodulação.
- Medição da impedância complexa de alto-falantes.
- Gravações gerais ao disco rígido com as taxas de amostragem comuns na área de áudio (32, 44.1, 48, 96, 192 kHz).
- Reproduções de alta qualidade de arquivos de áudio através do amplificador de potência embutido para apresentações.

Para resumir, a grande maioria das tarefas comumente executadas em laboratórios de acústica pode ser acudida pelo novo sistema a ser desenvolvida, dispensando outros equipamentos externos, fora os transdutores e o computador. Como o novo sistema disporá de um interface para o qual existem *drivers* para os sistemas operacionais mais comuns (*Windows*, *Linux* e o *OS-X* da Apple), os softwares já desenvolvidos para os equipamentos em uso agora (por exemplo *setups* do *Labview*, que está sendo amplamente usado na área de instrumentação e medição) podem continuar a ser utilizados com poucas modificações. Novas aplicações poderão ser desenvolvidas facilmente nas plataformas prediletas dos usuários (por exemplo, o onipresente *Matlab*), devido ao uso universal e à possibilidade de controlar todas as funções do sistema mediante o computador.

### 3. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MEDIÇÕES

Levando em consideração as demandas de todos os usuários e os pré-requisitos dos vários procedimentos metrológicos levou às seguintes características do *frontend* de medições:

- Tamanho de um laptop comum para poder transportá-lo na pasta dele.
- Sistema de dois canais.
- Entradas e saídas analógicas no painel dianteiro, entradas e saídas de áudio digital no painel traseiro.
- Ligação dos sinais de entrada e saída ao computador mediante três meios fundamentais:
  - 1) Conexão analógica com 5V *full scale* a qualquer placa de som. Essa possibilidade garante que o sistema pode ser utilizado em conjunto com qualquer computador com placa de som, mesmo sem interface especializado. Porém, não é o uso preferível pois o ponto forte do sistema é o emprego de conversores AD/DA de altíssima qualidade. Em contrapartida, os conversores de placas de som embutidos nos computadores geralmente têm qualidade deplorável.
  - 2) Conexão digital no formato AES/EBU ou SP/DIF, respectivamente. Essa possibilidade constitui uma transmissão dos sinais com qualidade superior em relação à conexão analógica, já que os conversores internos do sistema têm uma faixa dinâmica superior à da qualquer placa de som. A conexão em ambas as direções pode ser estabelecida de modo

elétrico, com ligação simétrica via plug XLR, ou assimétrica via plug RCA, ou de modo ótico, via conector TOSLINK.

- 3) Conexão via interface proprietário da empresa de áudio RME. Essa é a conexão mais versátil porque permite transferir os sinais digitalizados e no mesmo tempo os dados do controle remoto concomitantemente via um só cabo do tipo *firewire*. Os interfaces disponíveis são uma placa PCI para uso em gabinetes *desktop* e uma placa *cardbus* para uso em laptops, com as mesmas características. Elas funcionam com base em DMA (Direct Memory Access), um modo seguro que transfere os dados de/para a memória do computador sem auxílio da CPU.

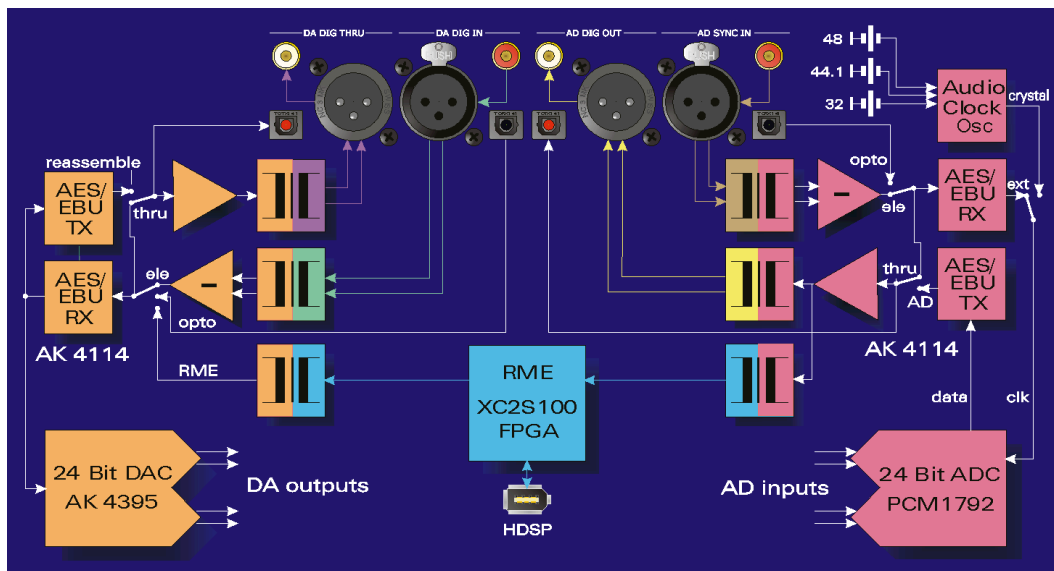


Figura 5: Amplas possibilidades de conexões digitais de áudio do sistema de medições

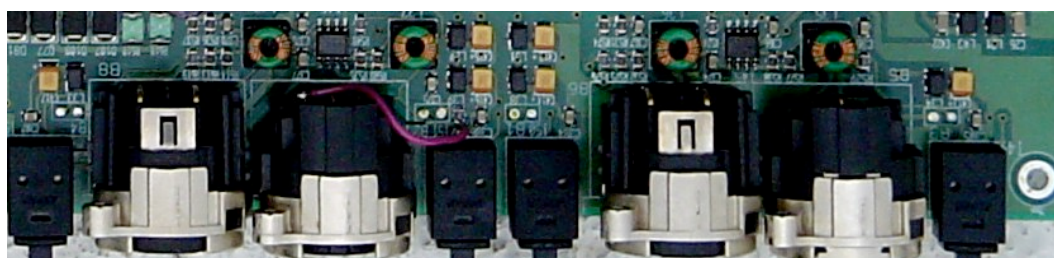


Figura 6: Conexões digitais na placa mãe do protótipo

- Controle remoto completo de todas as funções pelo PC através de um amplo leque de opções: RS232, porta paralela, teclado PS/2, *channel status* da conexão AES/EBU, Midi pelo interface Hammerfall DSP da RME.
- Compatibilidade com um velho sistema de medições mediante conector do tipo *sub min D* de 15 pinos. Esse conector aceitará os sinais analógicos com os mesmos níveis e nos mesmos pinos. Adicionalmente também aceita o formato de controle remoto do velho sistema. Isso significa que as velhas placas AD/DA de 16 bits poderão continuar a ser utilizados com o novo sistema.
- Indicação do estado de operação e dos níveis nas entradas e saídas analógicas por uma matrix de 60 LEDs no painel dianteiro.
- Conversores AD/DA da última geração com capacidade de 192 kHz de frequência de amostragem e faixa dinâmica superior a 117 dB.
- Separação galvânica total entre seção AD, seção DA, e ainda entre essas duas seções e o interface ao computador para evitar interferência por *ground loops* e perigo de queima de equipamentos em casos de acidentalmente ligar tensão da rede elétrica às entradas ou saídas.
- Fonte chaveada universal com pré-estágio PFC para a alimentação das várias secções com tensão da rede de 90 a 260 volts para economizar peso, cumprir futuras normas da comunidade europeia e fornecer energia suficiente ao amplificador de potência embutido.
- Fornecimento *Phantom* (48 V) para microfones de estúdio
- Fornecimento da voltagem de polarização (200V com alta exatidão) e da alimentação do pré-amplificador ( $\pm 14V$ ) de microfones capacitivos de laboratório.

- Fornecimento de corrente constante (4 mA regulado com alta precisão) para acelerômetros do tipo ICP empregados na área de vibrações.
- Fornecimento de uma voltagem de 6V para alimentar microfones eletretos.
- Ampla faixa de sensibilidade chaveada na entrada (-54 dBu..56 dBu, isso é uma faixa de 110 dB. 0 dBu corresponde a 775 mV RMS). Ganho mudável em passos de 10 dB, chaveados por relays e resistores de 0,1 % de tolerância) na entrada para a aceitação dos sinais mais fracos de transdutores dinâmicos até os sinais de saída dos amplificadores mais poderosos no mercado (com voltagem de saída em excesso de 200 Volts RMS).
- Processamento de sinais inteiramente simétrico, entrada e saída XLR. Opção de conexão de dispositivos assimétricos mediante conectores do tipo BNC.
- Opção modo *mono paralelo* na entrada, ligando o sinal de uma entrada aos dois pré-amplificadores. Proveitoso em medições de baixíssimos sinais, pois permite diminuir o ruído de fundo em 3 dB. Para essa opção, o software tem que adicionar os dois sinais oriundos do conversor AD.
- Opção *channel swap* na entrada, trocando os canais esquerdo e direito. Útil para alguns ensaios que demandam a troca dos canais para aumentar a precisão dos resultados.
- Acoplamento AC ou DC, mutável com relays, nos circuitos da entrada e da saída.
- Primeiro estágio de pré-amplificação com amplificador operacional LT1115 de baixíssimo ruído de fundo (0.95 nV/√Hz). Isso garantirá um ruído de fundo consideravelmente (10 dB) menor do que o do venerado pré-amplificador da B&K comumente utilizado (BK2636) para amplificar sinais de microfones.

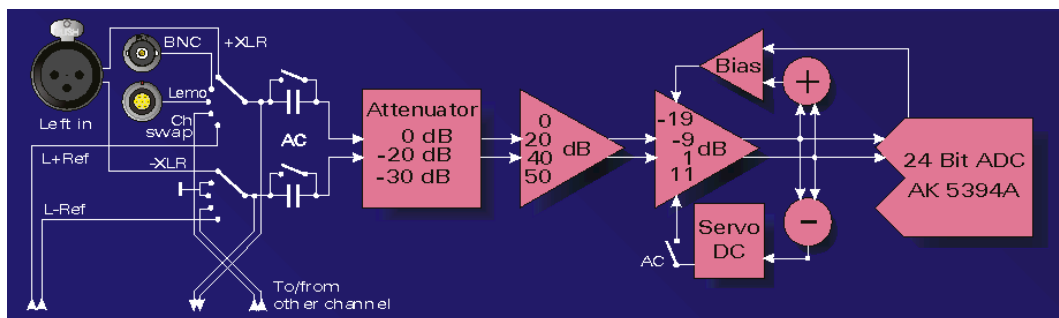


Figura 7: Diagrama de blocos do pré-amplificador e possibilidades de chaveamento na entrada

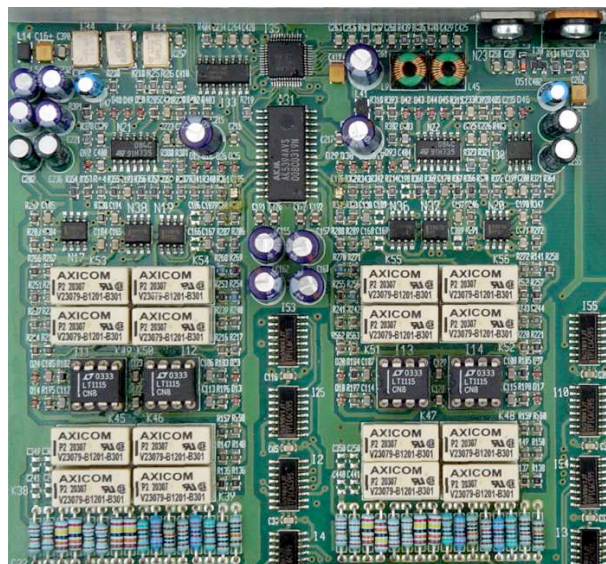


Figura 8: Pré-amplificadores, conversor AD, transmissor AES/EBU e osciladores para a geração da frequência de amostragem na placa mãe

- Modo *mono* na saída, somando os dois canais do conversor DA. Útil para medições de intermodulação, pois as duas frequências envolvidas não podem intermodular no conversor DA, já que eles saem dele separadamente no canal esquerdo e direito e só estão sendo somados analogicamente no último estágio. Além disso, um ganho de 3 dB na faixa dinâmica é obtido.
- Conexão automática das saídas às entradas nas medições de referência, escolha de referência simétrica ou assimétrica.

# I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical

- Voltagem de referência (5V) com exatidão de 0.02% para a auto-calibração da seção de entrada.
- Impedância da saída mutável entre 50 Ohms e 0 Ohms. A última opção é importante em medições de alta exatidão, porque impede qualquer queda da voltagem na saída quando conectando o dispositivo a ser ensaiado. Porém, pode levar a instabilidades quando cabos cumpridos estão acoplados à saída.
- Amplificador estéreo de potência para a conexão direta de alto-falantes. Será implementado um design com alta potência (2x 80W RMS contínuo) e eficiência melhorada (class-H), utilizando duas bitolas de voltagem de alimentação ( $\pm 17V$  e  $\pm 34V$ ) fornecidos pela fonte chaveada. Isso permite reduzir um pouco a dissipação de calor.
- Dispositivo para medir a impedância complexa de alto-falantes, composto por um resistor *shunt* de 1 Ohm e um resistor de referência de 10 Ohms, ambos com 1% de tolerância e capacidade de 30 watts.

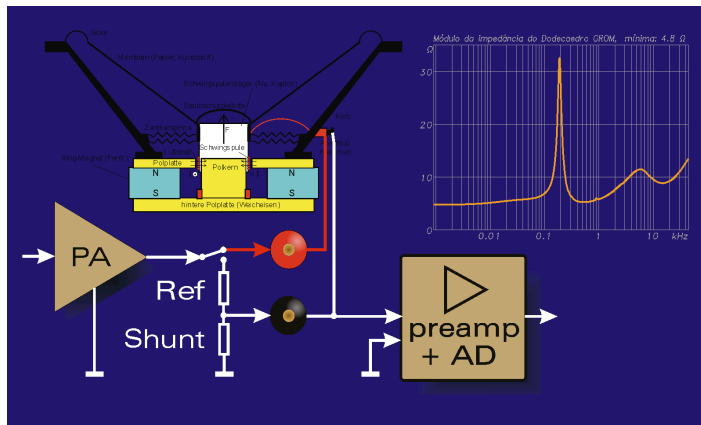


Figura 9: Princípio da avaliação da impedância de um alto-falante com o sistema de medição

- Conector de alto-falantes *Speakon* e *bornes*.
- Conector de fones de 3,5 mm, volume ajustável com potenciômetro.
- Microprocessador AT89C51ED2 da Atmel para o controle de todas as funções do sistema, com memória não-volátil para armazenar o último estado de operação.

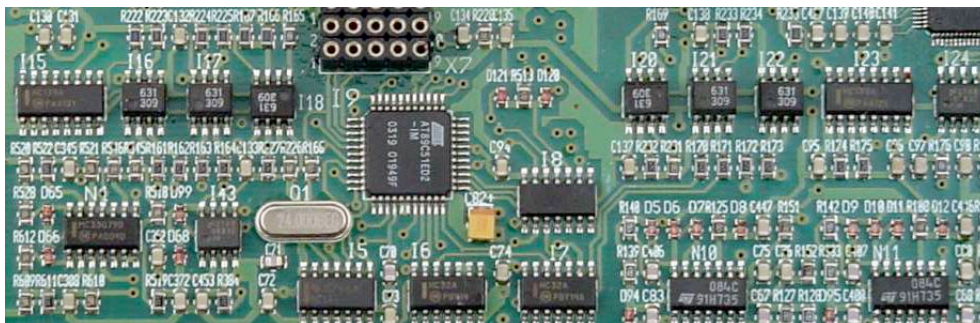


Figura 10: Parte do microprocessador na placa mãe

- Relais de miniatura do tipo biestável com capacidade de conduzir 2x 2 Ampères. Eles só consomem energia na hora de chavear (um pulso de meramente 10 milissegundos), o que reduz consideravelmente a corrente consumida e evita aquecimento desnecessário do sistema.
- Placa mãe com 4 camadas de cobre, espessura 70  $\mu m$  cada uma. Componentes do tipo SMD (*surface mount devices*) com algumas exceções (relais, semicondutores de potência, capacitores eletrolíticos, resistores de potência).

## 4. ESTADO ATUAL

O funcionamento da maior parte do segundo protótipo do circuito já foi checado. Tempo considerável foi gasto com a inauguração e o aperfeiçoamento da nova fonte chaveada, um circuito intrincado, composto por dois blocos intergrais:

- bloco PFC (Power Factor Control), que transforma a tensão da rede que pode variar entre 90 e 260 V RMS em uma tensão DC quase constante de 380 V e ainda garante uma corrente de

consumo quase senoidal, em fase com a tensão da rede, minimizando desta maneira a poluição da rede elétrica com harmônicos de 60 Hz.

- bloco meia-ponte em ressonância que gera todas as tensões secundárias com uma frequência de chaveamento de aproximadamente 130 kHz.

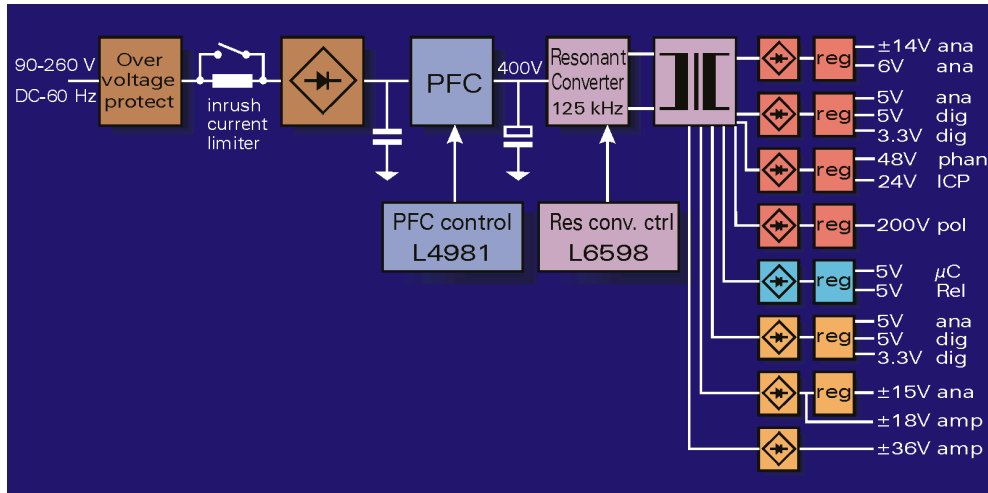


Figura 11: Diagrama em blocos da fonte chaveada

Os dois blocos são sincronizados, quer dizer trabalham com a mesma frequência de chaveamento, assim minimizando interferência no circuito sensível do pré-amplificador. O conversor meia-ponte em ressonância é o gerador da frequência.

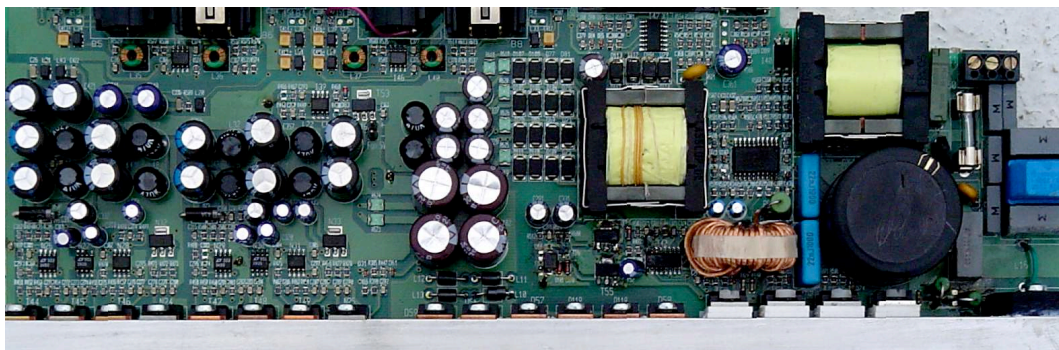


Figura 12: Seção da fonte chaveada na placa mãe do sistema de medições

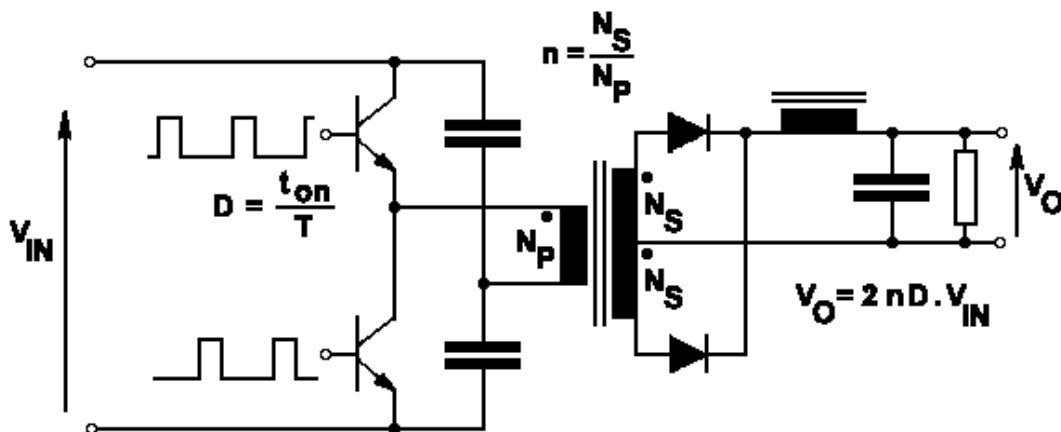


Figura 13: Fonte chaveada em topologia meia-ponte.

#### 4.1. Amplificador de potência classe H

O amplificador é uma parte integral do sistema. É basicamente por causa dele que se optou pela fonte chaveada, além da flexibilidade de ligar o sistema à qualquer rede elétrica no mundo com tensões que podem variar entre 90 e 260 Volts. Um transformador convencional teria sido grande demais para as dimensões restritas do sistema e teria adicionado bastante peso, frustrando o uso cômodo como sistema de medições portátil.

Outro problema é a geração de calor, que normalmente requer um dissipador grande. Para diminuir o calor, existem várias técnicas, das quais a chamada “class-H” foi implementada. Essa técnica trabalha com duas ou mais bitolas de voltagem. Quando o sinal de áudio é pequeno, a bitola de voltagens mais baixas é fornecida ao circuito do amplificador. Quando a amplitude do sinal ultrapassa um certo limite, a segunda bitola com voltagem mais alta é fornecida ao circuito do amplificador.

Com essa técnica, a potência de perda, ou seja, o produto da corrente vezes a voltagem entre saída e bitola diminui consideravelmente. A eficiência pode chegar a 60%.

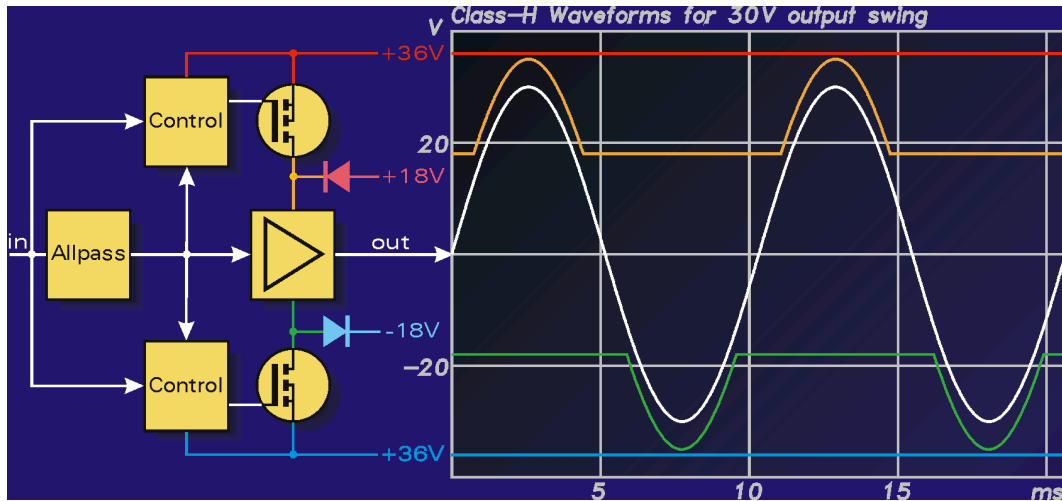


Figura 14: Princípio de funcionamento do amplificador com duas bitolas de voltagem de fornecimento

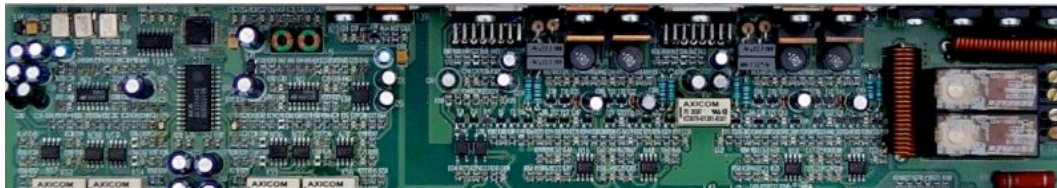


Figura 15: Amplificador na placa mãe (lado direito)

O funcionamento do chaveamento da segunda bitola já foi verificado. No primeiro protótipo, esse chaveamento ainda apresentou problemas de estabilidade que resultou em oscilações de alta frequência. No segundo protótipo, esse problema foi resolvido com um filtro composto por um indutor e um capacitor em série com um resistor nas linhas de alimentação do amplificador. As desestabilidades desapareceram e o circuito funciona satisfatoriamente até em altas frequências (até 50 kHz).

### 4.2. Interface de conexão ao computador

A interface para a conexão ao computador é uma peça-chave do novo sistema de medições. Se trata do núcleo de um sistema comercial de áudio de multi-pista, o sistema Hammerfall DSP da empresa RME. A tecnologia foi gentilmente concedida pela empresa para o uso neste sistema de medições, já que não constitui um produto de concorrência, pois os produtos da RME são mais voltados para o mercado dos músicos e áudio profissional e não para uso em laboratórios primários. O coração do interface é um FPGA (Field programmable Gate Array), um CI com altíssima complexidade que pode ser livremente programado para exercer qualquer função.



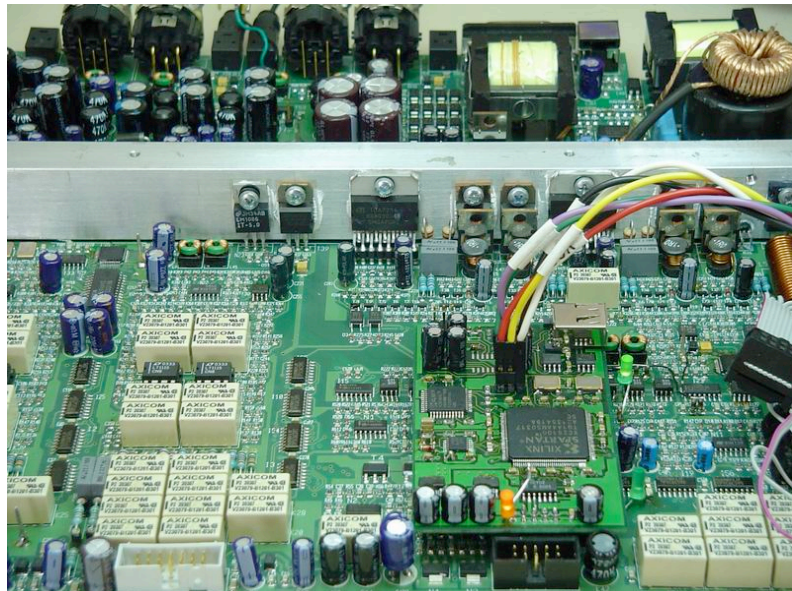


Figura 16: Pequena placa (com LED cor-de-laranja): Interface de áudio digital e controle remoto no padrão HDSP da RME

### 4.3. Controle remoto

Já existe um programa rudimentar para o microprocessador para lidar com as tarefas extensas de administração dos recursos do sistema, escrito por um colega do laboratório. Além disso, ele instaurou um programa de controle remoto no *Labview*, programa bastante utilizado na área de instrumentação. Rotinas particulares para o programa tradicional de medições *Monkey Forest* também já são implementadas.

O programa que roda no microprocessador continuará a ser desenvolvido, ainda faltam muitas partes tais como chaveamento da taxa de amostragem, controle da velocidade do ventilador através da temperatura medida em dois lugares, e controle remoto opcional mediante um teclado de PC comum ligado ao sistema.

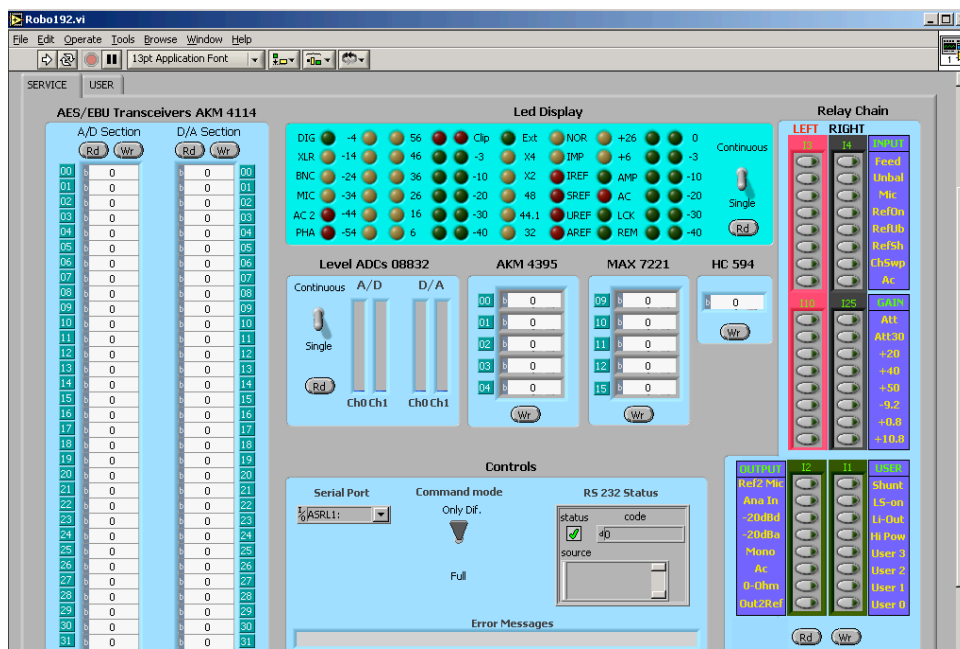


Figura 17: Interface de controle remoto do Labview, escrito por Nelson Melo de Espírito Santo

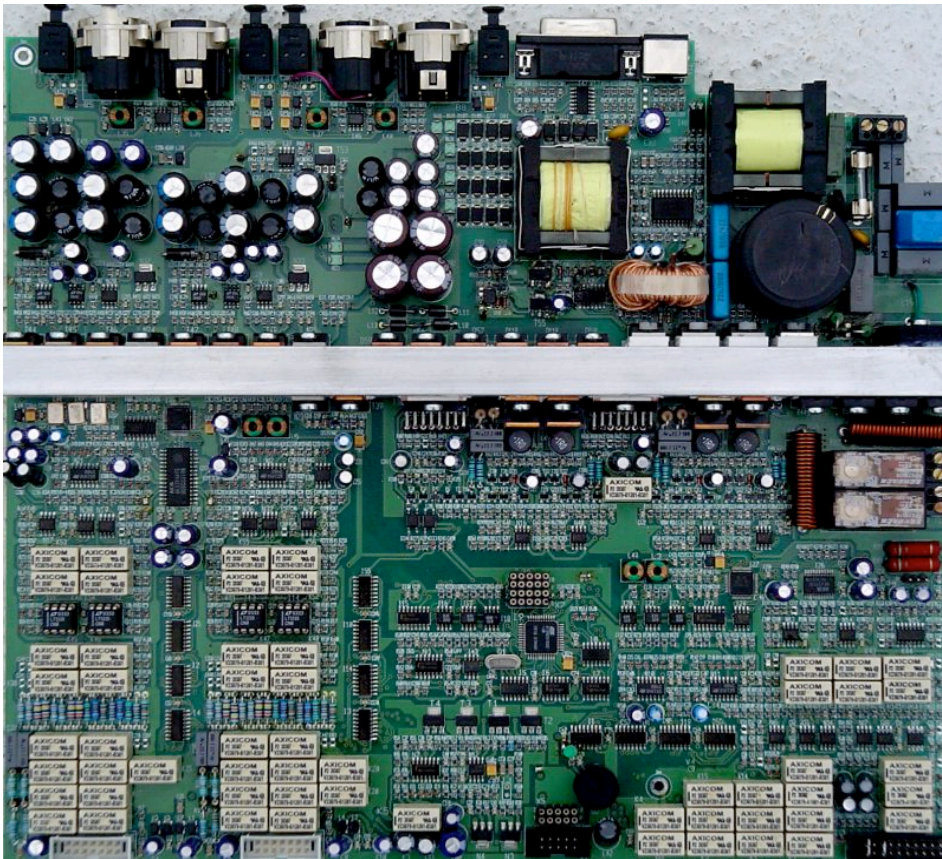


Figura 18: Vista da placa mãe do segundo protótipo

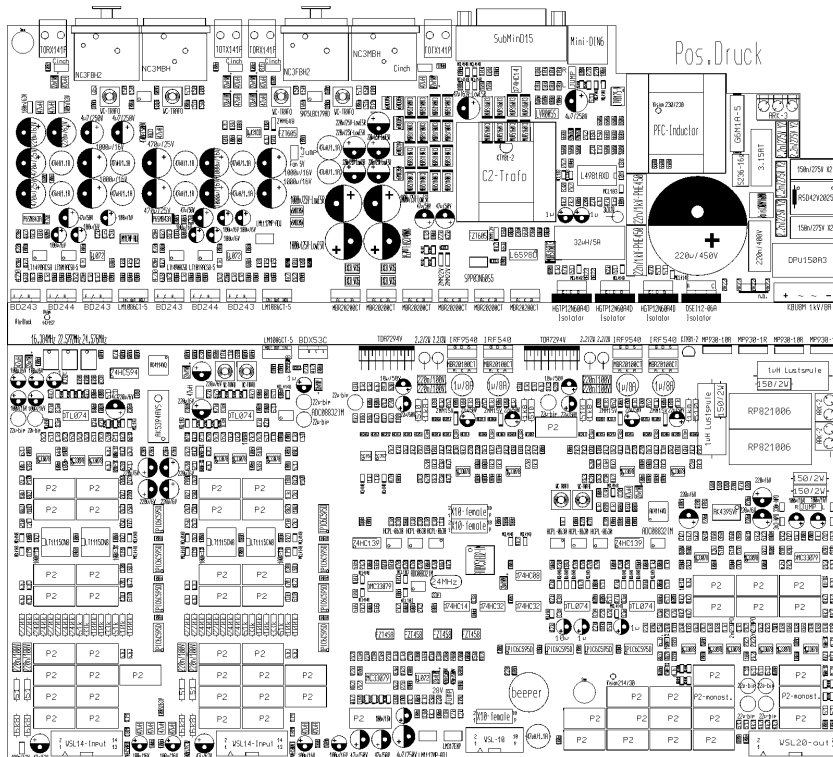


Figura 19: Plano dos componentes no segundo protótipo do sistema de medições.

# A DIVERSIDADE DE SINAIS E SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SONORA NA FAUNA BRASILEIRA

**Jacques M. E. Vielliard**

UNICAMP

e-mail: jacques@unicamp.br

Resumo: O Brasil, como região tropical, apresenta não somente uma das maiores biodiversidade do mundo, mas também uma alta diversidade de processos evolutivos e adaptações ecológicas. Isto se traduz pela existência de uma variedade única de comportamentos de comunicação sonora entre os diversos grupos animais que usam sinais acústicos para trocar informações. Com exemplos provenientes do Arquivo Sonoro Neotropical da UNICAMP, a diversidade dos sistemas de comunicação sonora será ilustrada e interpretada de maneira global: dos grilos até as baleias, passando por aves e anfíbios, os sinais acústicos mostram uma variação extremamente ampla. Os sistemas de comunicação sonora são também muito diversos, mas parecem se organizar segundo duas tendências: o uso de sinais simplificados sem perda de suas funções biológicas, ou o aumento máximo da complexidade dos sinais para garantir uma troca mais individualizada das informações úteis para o sucesso da espécie.

## 1. INTRODUÇÃO

Todos os animais precisam se comunicar, ou seja trocar informações que permitem aos indivíduos se manter em vida e se reproduzir. Como qualquer sistema de comunicação, a comunicação animal exige, além de um emissor e de um receptor, um sinal que possa carregar a informação desejada e transmiti-la de maneira eficiente. Este sinal pode ser de natureza variada, principalmente químico, visual ou sonoro. A comunicação baseada na transmissão de um sinal sonoro é um caso particular e relativamente raro no reino animal.

A comunicação sonora apareceu em diversos grupos animais, principalmente insetos como grilos e cigarras e vertebrados anfíbios, aves e mamíferos, onde se desenvolveu a partir de estruturas variadas de emissão e recepção, mas evoluiu de forma a tirar o melhor proveito das propriedades físicas do sinal sonoro. Cada espécie apresenta um sistema próprio bem definido de comunicação sonora, que procura se adequar funcionalmente às necessidades específicas de trocas de informações e às exigências de propagação impostas pelo ambiente onde vive.

O processo evolutivo ao qual a comunicação sonora animal foi submetida, como qualquer função biológica, levou ao desenvolvimento de uma imensa diversidade de sinais e sistemas. Todavia, as pressões adaptativas são também extremamente fortes e algumas regras e tendências aparecem transgredindo as relações filogenéticas. Em termos práticos, isto se traduz pela observação de que espécies não aparentadas podem usar soluções semelhantes a partir de condições diversas. Nesta perspectiva, é de se esperar a existência subjacente de tendências evolutivas gerais.

Proponho aqui a hipótese de que a evolução da comunicação sonora animal seguiu duas linhas-mestre excludentes. As espécies que usam a comunicação através de sinais sonoros desenvolveram, independentemente de suas estruturas anatômicas e capacidades fisiológicas, sistemas procurando ser ou o mais simples e estereotipado possível, ou com a maior complexidade e variabilidade que possam gerenciar.

Usando exemplos da fauna brasileira analisados no Laboratório de Bioacústica que criei na UNICAMP junto com o Arquivo Sonoro Neotropical onde as gravações correspondentes estão depositadas (Ranft 2004), procurei ilustrar a diversidade dos sinais e sistemas de comunicação sonora animal, organizando os casos específicos segundo a progressão evolutiva que defendo.

## 2. A NATUREZA DO SINAL DE COMUNICAÇÃO

O sinal sonoro é usado por um número restrito de grupos animais. Seu uso apareceu várias vezes e de maneira independente, ou seja a partir de estruturas diferentes de um grupo para outro. Por exemplo, vários grupos de insetos emitem sons com estruturas funcionando segundo o princípio do reco-reco, mas cada um apresenta uma organização anatômica particular (ver exemplos em Leroy

1979). Mesmo nas três classes de vertebrados que baseiam sua comunicação no sinal sonoro, o órgão emissor é fundamentalmente diferente, tanto na sua derivação anatômica, quanto na sua fisiologia funcional, entre anfíbios, aves e mamíferos.

A escolha de um tipo de sinal de comunicação não impede o uso complementar e eventualmente até concomitante de um sinal de outra natureza. Nos vertebrados em geral e no Homem em particular é comum o uso integrado de sinais sonoros e visuais. Todavia, na grande maioria das espécies de anfíbios e aves a comunicação é essencialmente sonora. Isto ocorre também em alguns grupos de mamíferos como quirópteros e cetáceos, cujo modo de vida noturno ou aquático, respectivamente, impede a comunicação visual. Os outros mamíferos costumam misturar sinais sonoros e visuais e incorporar ainda o uso de sinais químicos graças ao olfato aguçado que desenvolveram.

Vale a pena notar que um fenômeno evolutivo bem conhecido, a regressão secundária ou seja a perda de uma qualidade adquirida na linhagem ancestral da espécie, bem documentada em relação a estruturas anatômicas, se manifesta também no sistema de comunicação. Espécies de grilos, cigarras e anfíbios perderam a capacidade de emitir sons que seus ancestrais tinham, porque seu modo de vida particular favoreceu outro meio de comunicação mais eficiente. Nas aves, um grupo que se caracteriza por uma estrutura única de emissão de som, a siringe, algumas espécies perderam o uso da comunicação sonora em favor da visual por viver em lugares abertos e precisar de um longo alcance que a propagação sonora não pode oferecer. É o caso da Ema *Rhea americana*, dos urubus (família Cathartidae) como o Urubu-rei *Sarcoramphus papa* e de certos pássaros como o Galito *Alectrurus tricolor*. Enquanto este último, que vive espalhado nos campos limpos de cerrado, sinaliza sua presença exibindo sua silhueta única num poleiro elevado, mas conserva uma siringe funcional e emite sons de alcance íntimo durante a corte, a Ema nasce emitindo pios de contato, que evitam que se perca no capinzal onde o pai guia a prole, mas sua siringe regride assim que cresce num tamanho suficiente para enxergar e se mostrar à longa distância. O caso mais avançado de perda da comunicação sonora é o dos urubus, que usam visualização a longa distância quando voam e são capazes de localizar pelo olfato as carniças das quais se alimentam; eles já nascem sem siringe.

### 3. AS ESTRATÉGIAS ALTERNATIVAS DE COMUNICAÇÃO SONORA

As duas estratégias básicas de comunicação sonora encontradas entre os animais são excludentes. A alternativa fica entre usar um sinal simples, mas totalmente previsível, ou ao contrário, um sinal complexo e sujeito a variações que o tornam mais ou menos imprevisível. Em ambos casos, o sinal precisa ser funcional, ou seja carregar, no mínimo, a informação que permite o reconhecimento específico. Este sinal é o que defini como “canto funcional” (Vielliard 1987), cuja estrutura precisa ser característica da espécie, ao contrário das outras vocalizações que cumprem várias outras funções, como alarme ou corte, após o reconhecimento específico ter sido feito. É sobre este canto funcional que as pressões evolutivas vão se manifestar.

Na estratégia do canto estereotipado, a estrutura sonora simples deve ser diferenciada da das outras espécies. Devido ao grande número de espécies existentes que dependem de sinais sonoros de comunicação e ao intervalo finito do espaço fisiologicamente funcional dos parâmetros acústicos, cada espécie deve manter uma estrutura rigorosamente definida do som que usa para seu reconhecimento específico. Essas estruturas sonoras são determinadas geneticamente, como se verifica criando filhotes em isolamento acústico: apesar de nunca ter ouvido a voz da espécie, eles são capazes, por um mecanismo ainda desconhecido, de produzir a estrutura exata do canto específico.

Os cantos determinados geneticamente são portanto reconhecidos por ser estereotipados. Isto se deve não somente à necessidade de manter cada espécie distinta, mas sobretudo ao fenômeno dito de contra-seleção: o indivíduo que desvia do padrão não será reconhecido como membro da espécie e, em consequência, acabará eliminado. Tal fenômeno produz um padrão típico de evolução do canto no tempo e no espaço: a eliminação dos desviantes faz com que ao longo das gerações a estrutura do canto se mantém extremamente fixa e isto aparece nos padrões de variação do canto entre populações distantes. Um exemplo é o do Pinto-do-mato *Formicarius colma*, da família Formicariidae, cuja distribuição geográfica vai do sul da Mata Atlântica até os confins da Mata Amazônica; por ser um pássaro florestal terrestre que pouco se desloca, ele não é capaz de manter contatos distantes, ainda menos entre a Mata Atlântica e a Amazônica, disjuntas há pelo menos 18.000 anos: são portanto dezenas de milhares de gerações que separam os cantores da Ilha do Cardoso (SP) dos de Humaitá do Moa (AC), mas suas vozes continuam extremamente semelhantes (Silva 1995), atestando a força da contra-seleção sobre a estrutura do canto geneticamente determinado.

A estratégia de desenvolver um sinal mais complexo e mais flexível requer um mecanismo ontogênico diametralmente diferente: a aprendizagem. A capacidade cerebral de aprender os sinais de comunicação apareceu, curiosamente, três vezes entre as aves e três vezes entre os mamíferos. Este fenômeno é bem estudado entre algumas espécies de pássaros canoros (a sub-ordem dos Passeriformes Oscines) que forneceram modelos importantes para a teoria do aprendizado (veja Kroodsma & Miller 1996, Marler 2004, Todt 2004). Dois outros grupos, não aparentados, de aves mostraram possuir a capacidade de aprendizagem, ainda que isto foi comprovado somente em poucas espécies de papagaios (Psittaciformes) e, mais recentemente (Jarvis *et al.* 2000), beija-flores (Trochiliformes). Entre os mamíferos com capacidades de aprendizagem dos sinais sonoros de comunicação, morcegos (Chiroptera), golfinhos e baleias (Cetacea) e macacos (Primata), os mecanismos de aprendizagem são bem documentados em algumas espécies de cetáceos e de primatas, mas a abordagem experimental fica restrita essencialmente aos primatas superiores.

A aprendizagem do canto faz com que possa se desenvolver uma certa variedade da estrutura do canto entre os indivíduos da espécie, sem perder todavia o código de reconhecimento específico. O desafio, portanto, é de conciliar a permanência de uma informação específica fixa com a introdução de variações populacionais e até individuais. Para descobrir, numa espécie de canto aprendido, quais são os parâmetros físicos que carregam este código específico é necessário testar a reação a sinais modificados; alterando a estrutura do canto parâmetro por parâmetro de maneira controlada, descobre-se quais características devem ser preservadas para que o sinal seja reconhecido pela espécie. Isto é feito de maneira experimental na natureza, observando a resposta de um macho territorial que normalmente reage de maneira agressiva à emissão do canto da espécie. Trata-se de um procedimento que exige um grande número de testes delicados e em condições bem definidas, algo difícil de realizar fora do laboratório. Por essa razão, poucas são as espécies de aves com canto aprendido cujos códigos de reconhecimento específico foram desvendados, mas os resultados obtidos até agora confirmam a impressão de que os parâmetros envolvidos são extremamente diversos de uma espécie para outra. Por exemplo, o Sabiá-laranjeira *Turdus rufiventris*, cujo canto apresenta diferenças individuais bem marcadas, se distingue dos outros sabiás sintópicos pelo ritmo de emissão das notas e o intervalo entre elas (Silva & Vielliard 1994), mas no caso do Pupa-pula assobiador *Basileuterus leucoblepharus*, que apresenta variações individuais, porém discretas na estrutura relativamente simples de seu canto, o que determina o reconhecimento específico é a razão da diminuição da frequência média entre notas consecutivas (Aubin *et al.* 2004).

Os cantos aprendidos permitem incorporar ao sinal de reconhecimento específico uma função de reconhecimento populacional ou individual. No primeiro caso, onde todos os cantores de uma determinada população compartilham uma estrutura bastante fixa de canto, as variações são geográficas e formam dialetos; isto deriva do processo de aprendizagem baseado na imitação de um modelo durante fases bem definidas da vida do filhote, como foi demonstrado no Tico-tico da Califórnia *Zonotrichia leucophrys* (Baptista 1975). Este processo de aprendizagem explica também os padrões de variações dialetais observados no nosso Tico-tico *Zonotrichia capensis* (Avelino & Vielliard 2004) e em várias outras espécies brasileiras de pássaros canoros (Passeriformes Oscines) como o Curió *Oryzoborus angolensis* ou o Bigodinho *Sporophila lineola*. Nesses casos, o canto é formado geralmente de uma frase dividida em várias partes, sugerindo uma certa distribuição das funções biológicas: por exemplo, a parte final do canto, que costuma ser mais variável, forneceria a informação de reconhecimento populacional, enquanto a parte central, mais fixa, corresponderia ao código específico. Todavia, a variação da estrutura do canto entre dialetos da mesma espécie chega ao ponto onde não se observa mais nenhuma estrutura comum, indicando que o reconhecimento específico, que pode ser facilmente comprovado por experiências de play-back cruzado entre populações distantes, se faz por atributos globais do canto e não por seus elementos discretos.

Os processos de aprendizagem que levam a um padrão de variação individual ainda não foram bem comprovados experimentalmente e devem ser múltiplos já que os padrões resultantes observados são diversos. Podem ser variações sutis em cima de uma estrutura simples e bastante constante, como em *Basileuterus leucoblepharus* (Aubin *et al.* 2004), ou diferenças estruturais afetando todos os elementos do canto e sua própria organização, como no caso de *Turdus rufiventris* (Silva 2001).

## 4. OS SINAIS SIMPLES E ESTEREOTIPADOS

O processo ontogênico baseado na determinação genética do canto permite desenvolver sistemas de comunicação cuja estratégia é de usar sinais os mais simples e estereotipados possíveis. O caso extremo é o do Pica-pau-rei *Campephilus robustus* e suas aloespécies, conhecidos pela batida dupla (“double-stroke”); trata-se de uma tamborilada aplicada pelo bico batendo

violentamente num tronco ou galho morto que serve de caixa de ressonância. A maioria das espécies de pica-paus (família Picidae) do mundo usa uma tamborilada como sinal sonoro de reconhecimento específico, ou seja “canto funcional” *sensu* Vielliard (1987), o código sendo o número, o ritmo e eventualmente a variação de amplitude da serie de batidas. As características acústicas dessas tamboriladas dependem das qualidades do substrato usado, a sonoridade da madeira escolhida para as batidas, e portanto não podem ser usadas para o reconhecimento específico. Desta maneira, as espécies de pica-paus que usam tamboriladas para se identificar dispõem de um número limitado de parâmetros para garantir esta função vital. Nesta situação a solução mais econômica é o sinal definido por um único intervalo entre duas batidas idênticas, o “double-stroke” do qual se apropriaram as espécies mais robustas. Verifiquei que o observador posicionado num território de *Campephilus robustus*, ao bater numa madeira ressonante duas vezes no ritmo adequado, virá surgir na sua direção o imponente macho deste pica-pau reagindo à invasão!

A comprovação do determinismo genético do canto pode ser obtida pela criação dos filhotes em isolamento acústico, algo relativamente fácil, mas que foi bem documentado apenas em poucas espécies, particularmente Tinamiformes (nhambus, macucos e aparentados) e Columbiformes (pombos, rolinhas e aparentados). Geralmente contenta-se com evidências indiretas, essencialmente a estereotipia do sinal, como nos Strigiformes (corujas, bacuraus e aparentados) e nos Passeriformes Suboscines (principalmente famílias Tyrannidae, Thamnophilidae, Furnariidae, Formicariidae e Rhinocryptidae). Na verdade, todas as aves atuais são consideradas pertencendo a este padrão de canto, com exceção daquelas com aprendizagem, mas tal generalização deve ser ponderada até maior comprovação. A descoberta recente da aprendizagem em beija-flores (Jarvis *et al.* 2000) evidencia o quanto nosso conhecimento das estratégias de comunicação nas aves é fragmentário, e não pode mascarar o fato que desconhecemos o processo ontogênico associado a esta faculdade de aprendizagem na imensa maioria das espécies; aliás, a variedade de sistemas de comunicação sonora observada entre espécies de beija-flores sugere que diversos processos ocorram neste grupo.

As estruturas sonoras usadas pelas espécies sem faculdade de aprendizagem precisam ser estereotipadas, mas nem sempre são simples. Observa-se em várias espécies, desde grilos e anfíbios até muitas aves, sinais múltiplos e complexos ainda que estereotipados. Isto parece corresponder, em parte, a necessidades impostas por uma organização social mais elaborada. Todavia, observa-se também uma tendência à simplificação da estrutura do sinal.

Fora as tamboriladas dos pica-paus, os cantos funcionais mais simples observados em aves são assobios puros sem modulações. O Macuco *Tinamus solitarius* e o Nhambu-preto *Crypturellus cinereus* emitem um único assobio, que funciona como sinal de reconhecimento específico; não tem duração bem definida e, portanto, a frequência representa o único parâmetro para codificar a identidade de cada espécie. Os caçadores descobriram faz tempo essas propriedades desses cantos estereotipados e usam pios para atrair as espécies imitadas. Assobios puros e sem modulação são usados também em duplas com intervalos fixos, aumentando um pouco a carga de informação, por exemplo na Rolinha-azul *Claravis pretiosa* ou no Caburezinho *Glaucidium minutissimum*. Esses sons apresentam uma estrutura temporal rudimentar e são bem adaptados à propagação em ambiente reverberante como a mata tropical. Eles também resultam de uma evolução filogenética como apareceu entre o Caburezinho da Mata Atlântica e suas aloespécies dos Andes e América Central de um lado, com canto assobiado simples, e o recém-descrito Caburezinho-da-Amazônia (e Mata Atlântica do Nordeste) *Glaucidium hardyi*, cujo canto em staccato revelou pertencer a uma linhagem distinta: trata-se de duas espécies crípticas, ou seja morfológicamente semelhantes mas filogeneticamente separadas (Vielliard 1989).

Apesar de geneticamente determinados, os sons emitidos por certas espécies mostram uma diversidade funcional e estrutural. No grilo *Endocous itatibensis* o sinal sonoro é produzido, como na maioria dos insetos à exceção das cigarras, por um tipo de reco-reco, o que limita as variações acústicas possíveis ao parâmetro de tempo, mas não impediu o desenvolvimento de seis padrões sonoros diferentes, cada um com uma função biológica determinada (Zefa & Vielliard 2001). Nos anfíbios o canto funcional (*sensu* Vielliard 1987) é geralmente constante para cada espécie, a não ser pequenas variações, principalmente na duração ou no número de elementos sonoros, dependendo de fatores comportamentais, mas algumas espécies apresentam variações na estrutura física de seu canto. É o caso da perereca *Hyla minuta*, cujo canto é uma serie curta de notas de três tipos; variando a combinação dessas notas, que parecem carregar informações distintas, seja de agressividade, seja de cortejo, a espécie é capaz de emitir mais de vinte frases diferentes conforme a situação (Haddad 1988).

No caso das aves, a complexidade do repertório vocal aumenta com o grau de socialização da espécie, pois à medida que se desenvolvem as interações sociais, crescem as necessidades de comunicação. Interessantemente, este fenômeno se observa tanto em espécies sem, quanto em espécies com capacidade de aprendizagem. Na primeira categoria figura o Anu-branco *Guira guira*, cujo repertório vocal é composto de 28 tipos de vocalizações, alguns com estrutura complexa e cada

um com uma função própria; o mais extraordinário é que essas aves bastante primitivas são capazes de produzir recombinações entre essas categorias de sinais, algo que se considerava exclusivo dos macacos (Fandiño-Mariño 1989). O mesmo se observa em algumas espécies com aprendizagem, como a Gralha-azul *Cyanocorax caeruleus*, que apresenta um repertório de 14 tipos de sinais sonoros bem definidos e diversos casos de recombinações (Anjos & Vielliard 1993).

### 5. OS SINAIS APRENDIDOS

A aprendizagem do canto, tal qual é conhecida até hoje entre as aves, se faz segundo um processo em três etapas: na primeira, enquanto o filhote está em contato com o pai e seus vizinhos, acontece a memorização dos sons que se encaixam no “template” ou modelo-padrão da espécie; na segunda, dita refratária, o filhote, já emancipado e submetido a outras experiências auditivas, não retém nada; na terceira, chamada de cristalização, que corresponde ao momento quando o jovem entra na maturidade sexual e vai tentar estabelecer um território e uma família, ele vai treinar a emissão do canto que memorizou na primeira fase e eventualmente ajustá-lo ao dialeto onde se estabeleceu, se for diferente do seu lugar de nascimento. Este modelo responde perfeitamente às observações feitas com esses pássaros canoros que apresentam dialetos regionais bem definidos. Desvios acontecem quando um cantor se desloca ou fez sua aprendizagem numa zona de contato entre dois dialetos: um cantor pode aprender e usar dois dialetos. Todavia, as formas dialetais observadas sempre vem de um modelo prévio, dando uma boa estabilidade a esses dialetos.

O desenvolvimento de dialetos regionais, mais ou menos restritos em tamanho, introduz somente uma variável suplementar em relação ao canto estereotipado: o reconhecimento populacional, além do específico. Isto fornece uma grande vantagem para o cantor que precisa demarcar seu território: ele reservará o máximo de suas energias para responder a um cantor de outro dialeto, identificado assim como invasor. Todavia, somente um sistema de reconhecimento individual irá evitar brigas repetitivas entre vizinhos; mas, mesmo num sistema dialetal, um cantor pode rapidamente identificar seus vizinhos pela posição espacial e talvez alguma outra particularidade, economizando energia uma vez que os limites territoriais respectivos foram estabelecidos.

Para aumentar a carga informática do canto, algumas espécies de aves desenvolveram mais de um tipo individual de canto. Cada tipo de canto corresponde a um canto funcional, com suas variações geográficas, mas parece que a cada um desses tipos de canto corresponde um contexto comportamental particular. Desta maneira a espécie poderá transmitir, além da sua identificação específica e populacional, uma informação sobre seu estado comportamental e fisiológico. Parece que a frequência de cada tipo de canto varia ao longo do ciclo biológico, indicando particularmente a receptividade sexual do indivíduo, e também conforme seu estado fisiológico, notadamente seu grau de agressividade territorial. Esta estratégia de comunicação é conhecida em espécies de algumas famílias de Oscines, geralmente com somente dois tipos de canto. O exemplo observado com o maior número de tipos de cantos é o do Pitiguari *Cyclarhis gujanensis*: o macho tem 7 tipos diferentes de canto e a fêmea um (Lima 1997).

No caso das espécies, que descobrimos serem cada vez mais comuns que se pensava, com variação individual do canto, o processo de aprendizagem por imitação de um modelo não explica a realidade observada, notadamente o fato de que dois vizinhos não compartilham estruturas sonoras. Deve existir portanto um fator de inovação individual, ainda que dentro de certos limites dos parâmetros físicos e preservando o código de reconhecimento específico.

### 6. O CANTO INDIVIDUAL

O caso extremo de variação do canto funcional é quando cada cantor da espécie emite, sem perder o código de reconhecimento específico, uma estrutura peculiar deste sinal de comunicação. Esta variação individual, que pode ser facilmente comprovada pela observação atenta do canto emitido por vizinhos da mesma espécie, se dá de diversas maneiras: estruturas sonoras globalmente diversas, elementos sonoros compartilhados mas emitidos de maneira diferente, elementos sonoros diferentes e emitidos numa seqüência própria, imitações diversas sem seqüência definida. Essas categorias não são estanques e indivíduos de uma mesma espécie podem se encaixar em categorias diferentes. Para ser mais objetivo, apresentarei a seguir alguns casos da fauna brasileira que ilustram diversas situações de variações individuais. Vale lembrar, antes de analisar esses casos, que o reconhecimento individual providencia uma enorme vantagem, principalmente evitando a repetição de conflitos previamente resolvidos e talvez também fornecendo informações pouco desgastantes mas úteis para a seleção sexual.

No caso do Tiziu *Volatinia jacarina* observa-se uma extrema variação inter-individual na estrutura física do canto (Fandiño-Mariño & Vielliard 2004): cada cantor repete com precisão extraordinária todos os detalhes extremamente complexos deste canto que dura em torno de meio segundo, mas não se encontra duas estruturas idênticas entre indivíduos diferentes, vizinhos ou não. Existe, para manter o reconhecimento específico, que o observador percebe pela constante onomatopéica “tiziu”, um envelope melódico e temporal bem definida do sinal. Dentro deste envelope, o sinal, apesar de breve e contínuo, é composto de diversos blocos, cada um com suas características básicas, mas também com um amplo leque de diferenciações. Isto permite um número extremamente elevado de combinações sem perder o padrão específico. O sistema de comunicação do Tiziu foi descoberto por acaso recentemente e ainda não está totalmente desvendado, mas indica a existência de um processo ontogênico peculiar.

Uma outra maneira de obter um canto individual é variando a seqüência dos elementos sonoros, ou notas. Observei isto no canto de beija-flores dos gêneros *Colibri* e *Augastes*, que emitem uma série de quatro a seis tipos de notas em seqüências relativamente bem definidas por indivíduo, mas bem diferentes entre eles (Vielliard 1983). A estrutura dos tipos de notas pode ser aprendida por imitação de um modelo, pois observei dois vizinhos de *Colibri serrirostris* emitindo os mesmos tipos de notas, que devem ter aprendido portanto do mesmo tutor, mas segundo seqüências diferentes (Vielliard 1983). É necessário criar esses beija-flores em condições controladas para se descobrir como os filhotes adquirem seu canto; parece que as estruturas são aprendidas por imitação, mas que o sequenciamento da emissão segue outra regra individual. Seria portanto um processo inédito de aprendizagem e ontogenia comportamental.

Nos sabiás do gênero *Turdus*, a variação individual afeta tanto a estrutura das unidades sonoras, quanto sua seqüência de emissão. Isto foi bem documentado no Sabiá-laranjeira *Turdus rufiventris* (Silva 2001), que era dado por apresentar variações regionais, mas tem um canto estritamente individual. O canto é feito de uma seqüência de notas discretas emitidas numa seqüência individualmente definida, mas não totalmente previsível em geral. Cada indivíduo tem em média uma dúzia de tipos de notas, que não compartilha com nenhum vizinho. Este tipo de canto, além de ser individual, é chamado também de versátil porque, em certos cantores pelo menos, a seqüência das notas não é fixa: após a nota de tipo A pode aparecer tanto uma nota B, quanto uma nota X ou ainda outra nota qualquer e até a repetição da nota A; quando a nota A aparece de novo, a incerteza da emissão seguinte continua. Isto é o chamado canto versátil que aparenta ser caótico.

Outra forma de canto considerado versátil é composta de centenas de elementos distintos no repertório de cada indivíduo. É o caso do Rouxinol europeu *Luscinia philomelos*, assim como algumas outras espécies parentes (sub-família Turdinae, como os sabiás), que chega a ter 600 frases memorizadas e emitidas numa seqüência que parece aleatória. Este tipo de canto se encontra também em espécies de corruiras (Troglodytinae), notadamente a Corruira-do-brejo *Cistothorus platensis*, que além de memorizar até mais de 300 frases diferentes é capaz de responder imediatamente ao cantor vizinho com a frase mais semelhante de seu repertório. Este fenômeno é chamado de “song-matching” e acontece com maior intensidade nas populações mais sedentárias, ou seja nos trópicos (Kroodsma *et al.* 1999).

Mais difícil de encaixar numa categoria, porque parece ser único, é o canto da Baleia-jubarte *Megaptera novaeangliae*. Cada população apresenta um dialeto, que pode mudar ao longo do tempo. O canto é formado por uma série extremamente longa de emissões discretas de notas segundo uma seqüência determinada em parte. São diversos tipos de notas repetidas várias vezes, em conjuntos definidos que formam temas: o cantor, após repetir o conjunto de notas de um tema várias vezes e com variações na seqüência, passa ao tema seguinte, sempre na mesma ordem. A população de Baleia-jubarte de Abrolhos tinha, no ano 2000, 24 tipos de notas organizados em 5 temas (Arraut & Vielliard 2004), um dos mais ricos repertórios já documentado para a espécie ao redor do mundo. O caráter único deste dialeto é que, ao contrário do que se observa nas espécies com dialeto, as novas notas introduzidas por um forasteiro são prontamente incorporadas ao dialeto, fazendo com que a estrutura do canto da população evolui rapidamente no tempo, de uma temporada para outra e até durante a temporada (Arraut & Vielliard 2004).

## 7. IMITAÇÕES

Várias espécies de aves, entre diversas famílias de pássaros canoros (Passeriformes Oscines), incorporaram imitações de sons estranhos ao seu canto. O fenômeno apareceu, portanto, várias vezes durante o processo evolutivo. Diversas hipóteses já foram sugeridas, implicando o modelo ou procurando justificações seletivas. A explicação me parece muito mais simples: a imitação de sons do ambiente permite ao cantor aumentar a complexidade de seu sinal e garantir sua individualidade. No lugar de inventar e aprender um número alto de estruturas sonoras e de criar uma seqüência de



emissão, é mais econômico memorizar alguns sons do ambiente e incorporá-los na organização temporal do canto específico.

A observação das aves que tem um canto com imitações naturais (os papagaios ditos faladores somente imitam sons estranhos quando são mantidos em isolamento) mostra que normalmente tal canto não provoca nenhuma interação entre o modelo e o imitador. O objetivo claramente não é de enganar ninguém, o que pode acontecer de maneira circunstancial, mas nunca duradoura. O único resultado objetivo da incorporação de imitações no canto de uma espécie é de aumentar sua carga informativa, sua entropia, o que vai de encontro com nossa teoria de tendência evolutiva ao aumento da complexidade, garantindo uma eficiente diferenciação individual a baixo custo.

Todavia, não se pode esquecer da necessidade de preservar o código de reconhecimento específico. Já que esta informação pode ser colocada em qualquer parâmetro, como vimos anteriormente, pode-se facilmente imaginar o uso de imitações estranhas numa estrutura temporal de emissão que permita o reconhecimento específico. É o que deve ter acontecido com o bem-denominado Sabiá-poliglota *Turdus lawrencei* do sudoeste amazônico: seu canto é composto exclusivamente de imitações, mas não deixa de provocar uma reação específica de defesa territorial ao seu play-back. Além de não ficar claro aonde se encontra o código de reconhecimento específico, pois não existe um único elemento sonoro próprio, é de se admirar a capacidade, que eu saiba insuperada, de memorizar imitações. Um cantor (o melhor que encontrei até hoje) do Acre emitiu, num canto de 15 minutos, imitações fidedignas de cantos completos e complexos de 52 espécies diferentes, algumas sem vocalizar naquela época do ano. Obviamente, tal canto apresenta alta individualidade e alta entropia, representando um estágio avançado na estratégia de aumento da complexidade dos sistemas de comunicação animal.

## 8. CONCLUSÕES

A alta diversidade biológica que se desenvolveu nas regiões tropicais em geral e no Brasil em particular oferece uma imagem rica dos processos evolutivos. Isto se aplica a todos os aspectos da vida animal, inclusive a comunicação. No caso dos sinais e sistemas de comunicação sonora observa-se uma grande variedade de estruturas e estratégias entre as poucas espécies devidamente analisadas. Mesmo assim, é possível propor desde já algumas hipóteses sobre as adaptações e tendências evolutivas da comunicação sonora:

- 1) a estrutura dos sinais sonoros de comunicação e sua organização em sistemas específicos de comunicação são regidas por processos evolutivos e pressões adaptativas;
- 2) cada espécie desenvolve seu sistema de comunicação a partir de suas relações filogenéticas e conforme suas exigências, especialmente em relação ao meio de propagação e às necessidades de sua organização social;
- 3) cada modalidade de ontogenia dos sinais de comunicação determina uma estratégia excludente: o canto determinado geneticamente promove um sinal estereotipado e muito fixo através as gerações, enquanto a aprendizagem do canto permite uma certa flexibilidade do sinal e do sistema de comunicação;
- 4) na estratégia do canto estereotipado, observa-se uma tendência à maior simplificação possível do sinal de comunicação;
- 5) na estratégia do canto aprendido, percebe-se uma tendência à maior complexidade possível do sinal de comunicação;
- 6) em ambos casos, verifica-se que o código específico de reconhecimento é mantido, ainda que somente em poucas espécies se saiba quais parâmetros do sinal respondem por esta função vital;
- 7) várias soluções apareceram para aumentar a complexidade do sistema de comunicação, todas no intuito de permitir a transmissão de informações além do código específico, como reconhecimento populacional ou até individual e informações sobre o estado fisiológico (defesa territorial, seleção sexual);
- 8) a forma de canto dito versátil permite, além do reconhecimento individual, um aumento da entropia que pode servir para seleção sexual;
- 9) a incorporação de imitações no canto específico é uma maneira de aumentar sua individualidade e sua entropia.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anjos, L. and Vielliard, J.M.E. (1993). - Vocal repertoire of the Azure Jay *Cyanocorax caeruleus*. *Rev. Bras. Zool.* 10: 657-664.
- Arraut, E.M. and Vielliard, J.M.E. (2004). - The song of the Brazilian population of Humpback Whale *Megaptera novaeangliae*, in the year 2000: individual song variations and possible implications. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 373-380.
- Aubin, T., Mathevon, N., Silva, M.L., Vielliard, J.M.E. and Sebe, F. (2004). - How a simple and stereotyped acoustic signal transmits individual information: the song of the White-browed Warbler *Basileuterus leucoblepharus*. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 335-344.
- Avelino, M.F. and Vielliard, J.M.E. (2004). - Comparative analysis of the song of the Rufous-collared Sparrow *Zonotrichia capensis* (Emberizidae) between Campinas and Botucatu, São Paulo State, Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 345-349.
- Baptista, L.F. (1975). - Song dialects and demes in sedentary populations of the White-crowned Sparrow (*Zonotrichia leucophrys nuttalli*). *Univ. California Publ. Zool.* 105: 1-52.
- Fandiño-Mariño, H. (1989). - *A comunicação sonora do Anu-branco* Guira guira. Edit. UNICAMP, Campinas.
- Fandiño-Mariño, H. and Vielliard, J.M.E. (2004). - Complex communication signals: the case of the Blue-black Grassquit *Volatinia jacarina* (Aves, Emberizidae) song. Part I – A structural analysis. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 325-334.
- Haddad, C.F.B. (1988). - Comportamento reprodutivo e comunicação sonora de *Hyla minuta* Peters, 1872 (Amphibia, Anura, Hylidae). Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas.
- Jarvis, E.D., Ribeiro, S., Silva, M.L., Ventura, D., Vielliard, J.M.E. and Mello, C.V. (2000). - Behaviorally-driven gene expression reveals hummingbird brain vocal nuclei. *Nature* 406: 628-632.
- Kroodsma, D.E. and Miller, E.H. (1996). - *Ecology and evolution of acoustic communication in birds*. Cornell Univ. Press, Ithaca, NY.
- Kroodsma, D.E., Sánchez, J., Stemple, D.W., Goodwin, E., Silva, M.L. and Vielliard, J.M.E. (1999). - Sedentary life style of Neotropical Sedge Wrens promotes song imitation. *Anim. Behav.* 57: 855-863.
- Leroy, Y. (1979). - *L'univers sonore animal: rôles et évolution de la communication acoustique*. Gauthier-Villars, Paris.
- Lima, V.S. (1997). - Os sons do Pitiguari *Cyclarhis gujanensis*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas.
- Marler, P. (2004). - Innateness and the instinct to learn. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 189-200.
- Ranft, R. (2004). - Natural sound archives: past, present and future. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 455-465.
- Silva, M.L. (1995). - Estereotipia e versatilidade nos cantos das aves: os padrões de canto em sabiás e outras aves. *Anais de Etologia* 13: 133-147.
- Silva, M.L. (2001). - Estrutura e organização de sinais de comunicação complexos: o caso do Sabiá-laranjeira *Turdus rufiventris* (Aves, Passeriformes, Turdinae). Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Silva, M.L. and Vielliard, J.M.E. (1994). - Song discrimination among sympatric *Turdus* thrushes in Brazil. *XXI International Ornithological Congress Notebook*. Vienna, Austria.
- Todt, D. (2004). - From birdsong to speech: a plea for comparative approaches. *An. Acad. Bras. Cienc.* 76: 201-208.
- Vielliard, J.M.E. (1983). - Catálogo sonográfico dos cantos e piados dos beija-flores do Brasil, 1. *Bol. Museu de Biologia "Mello Leitão"*, Série Biologia 58: 1-20.
- Vielliard, J.M.E. (1987). - Uso da bioacústica na observação de aves. In: Coelho, E.P. (Ed.), *II Enc. Nac. Anilhad. Aves*. UFRJ, Rio de Janeiro: 98-121.
- Vielliard, J.M.E. (1989). - Uma nova espécie de *Glaucidium* (Aves, Strigidae) da Amazônia. *Rev. Bras. Zool.* 6: 685-693.
- Zefa, E. and Vielliard, J.M.E. (2001). - Complex acoustic behaviour of *Endecous* crickets (Orthoptera, Phalangopsidae). *Abstracts XVIII IBAC*, Cogne, Italia.

# SOBRE A INFLUÊNCIA DO TETO MÓVEL NA QUALIDADE ACÚSTICA DA SALA SÃO PAULO

**Roberto A. Tenenbaum e Lenine Vasconcellos**

Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal do Rio de Janeiro

rtenenbaum@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo. A Sala São Paulo de concertos é reconhecida por músicos e críticos em geral por sua “boa acústica”. Tendo dimensões similares a de salas de concerto famosas, tem ainda a peculiaridade de possuir acústica variável graças às inúmeras configurações possíveis de seu teto móvel, o que é explorado por músicos e maestros, dependendo do estilo musical executado. Este trabalho reporta ensaios acústicos executados na Sala, para uma posição da fonte, algumas posições do ouvinte e variadas configurações de teto. Mediram-se as respostas impulsivas utilizando-se a técnica de varredura com preservação de fase, das quais extrairam-se os parâmetros de qualidade acústica da sala. Foram também levantadas respostas impulsivas binaurais com o uso de cabeça artificial e obtida a família de correlações cruzadas interaurais. São tecidas considerações sobre a relação entre os gêneros musicais e as respectivas configurações de teto e os parâmetros de qualidade acústica correspondentes.

## 1. INTRODUÇÃO

A Sala São Paulo de concertos, concluída em Julho de 1999, é resultado de variados processos de transformação urbana, arquitetônica, social e política por que passou a cidade de São Paulo ao longo de sua história recente. Desde a velha Estação de São Paulo da Estrada de Ferro Sorocabana, construída em 1938, passando por sua renovação arquitetônica em 1962, transformando-se em Estação Júlio Prestes, foi mantido sempre o espaço vazio de seu Grande Hall. Por conta dessa condição, digamos, providencial e devido ao fato de suas dimensões corresponderem às de uma sala de concertos, foi tomada, por volta de 1996, a decisão de se construir, no espaço de seu Grande Hall, a Sala SãoPaulodeconcertos,queviriaasertambém sede da Orquestra Sinfônica do Estado de São Paulo (OESP) [1].

Com efeito, construída com dimensões similares às de algumas salas de concerto do período romântico, ainda características de boa difusão sonora, devido à decoração em seu interior é considerada, por críticos, músicos e outros apreciadores como uma sala de acústica excelente, como expressa este depoimento do Maestro Alceo Bocchino: “...se você quer saber qual a melhor acústica que já experimentei, lá vai: Uma foi a do Concertgbaum, de Amsterdã, onde se ouve até a respiração do melhor flautista do mundo... e a outra foi a da Sala São Paulo de Concertos, uma acústica excelente!...” [2].

A Sala São Paulo de concertos é concebida, arquitetonicamente, como uma geometria essencialmente retangular, com 48.5 m de comprimento, 21 m de largura e 24.5 m de altura máxima, ocupando uma área cerca de 1000 m<sup>2</sup>. Comporta 1509 assentos distribuídos entre platéia, mezanino, balcões e coro, este por trás do palco. O projeto arquitetônico, a cargo de prestigioso escritório de São Paulo, contou com consultoria acústica de empresa especializada no exterior e um suporte adicional de consultora da própria cidade. O ponto fundamental do projeto - no que diz respeito a este trabalho - foi a decisão de prover a Sala de um forro ou teto móvel, permitindo assim a variação de suas características acústicas. Esse forro é composto por 45 placas retangulares dispostas em uma matriz de 5x9 com cada conjunto de três placas podendo mover-se independentemente. Na realidade, devido à extensa gama de variação de volume e de forma da sala, esta pode, ao menos teoricamente, ser afinada, ajustando-se às necessidades do estilo musical e preferências interpretativas do maestro ou solista.

A experiência de utilização da Sala São Paulo de concertos tem demonstrado que esse recurso é utilizado amiúde, por um processo *ad hoc*, seguindo muito mais a sensibilidade dos músicos - com sucesso - do que qualquer princípio científico. Este trabalho objetiva verificar o quão efetiva é, de fato, a variação das características acústicas da Sala em função das diversas configuração de teto, oferecendo assim algum suporte técnico-científico ao que já vem sendo realizado em termos acústicos e musicais na Sala São Paulo de concertos.

## 2. DOS ENSAIOS

Os ensaios acústicos na Sala São Paulo de concertos foram realizados concentradamente no dia 6 de junho de 2004, por uma equipe de pesquisadores e técnicos do Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA), do INMETRO, e do Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Contou ainda com a colaboração da equipe técnica da Sala, em especial o profissional responsável pela operação do forro móvel, essência de nossas investigações.

### 2.1 Limitações do ensaio

Qualquer procedimento experimental esbarra inevitavelmente em limitações de ordem prática que nem sempre são previstas no planejamento original da medição. Tais limitações muitas vezes determinam o rumo possível do trabalho a ser realizado.

As três maiores limitações do trabalho decorreram de: a distância entre a Sala São Paulo de concertos e as sedes dos laboratórios envolvidos, demandando toda uma logística relativa ao transporte do equipamento de medição; a pequena disponibilidade da agenda da Sala São Paulo de concertos, exigindo que os ensaios experimentais fossem integralmente executados em uma única jornada; a impossibilidade, de certo modo resultante das anteriores, de conduzir os ensaios acústicos na presença de público.

Mesmo dentro dessas limitações, e graças ao extremo profissionalismo demonstrado por todos os envolvidos no processo, as medições foram extremamente bem sucedidas, tendo sido obtidos dados com todo o rigor técnico necessário para posterior análise.

### 2.2 Procedimento de aquisição de dados

Em cada medição, procedeu-se conforme descrito a seguir. Uma vez posicionados fonte, cabeça artificial e par de microfones e escolhida uma configuração de teto, procedia-se à medição propriamente dita. A sala era então excitada três vezes com o mesmo sinal de varredura, gerando assim três arquivos digitais a partir do sinal captado pelos microfones e/ou cabeça artificial. Após essas três excitações, as posições dos microfones eram modificadas, de modo a se levantar a resposta impulsiva em diversas posições. Foram selecionadas sete posições de microfone no interior da sala, representativas das distintas situações da audiência (platéia, mezanino, balcão etc). Essa foi uma escolha *ad hoc*.

Embora o número mais apropriado de repetições seja entre 5 e 10 [3], devido à limitação de tempo já mencionada, optou-se por um número inferior de repetições de modo a se obter maior variedade de dados, visto que o objetivo central é a comparação entre algumas das configurações de teto possíveis dentro da sala. Após a varredura das posições selecionadas, a configuração do teto era, então, alterada e o processo repetido. Para todas as configurações de teto as posições de microfone e da cabeça artificial foram exatamente as mesmas.

Na configuração C - que será explicada adiante, juntamente com as demais - escolheu-se, além das posições utilizadas nas outras configurações, duas posições no palco. Essa foi uma tentativa de investigar queixas dos músicos referentes ao conjunto da sala (*ensemble*), parâmetro que descreve a maior ou menor facilidade que os músicos experimentam, em uma determinada sala, de tocar juntos e ouvir-se mutuamente [4], especialmente em situações de grande orquestra. Esses resultados ainda estão em fase de análise, não sendo reportados neste trabalho.

Uma vez repetido o processo para seis diferentes configurações escolhidas, obtivemos, para uma sétima, a resposta binaural, exclusivamente para o assento normalmente utilizado pelo Diretor Artístico da Sala. Nesse ponto, a medição foi repetida seis vezes.

O sinal de excitação utilizado foi a varredura em frequência (*sweep sine*) com preservação de informação de fase. Essa técnica apresenta algumas vantagens em relação às outras técnicas conhecidas para o levantamento das respostas impulsivas de uma sala, tais como tiros de arma de fogo, explosões, sinais de banda larga, (como ruído branco ou rosa), ou ainda as seqüências de comprimento máximo (MLS - *Maximum Length Sequences*). Uma primeira vantagem é a gama dinâmica que a técnica escolhida fornece, uma vez que, diferentemente da maioria dos demais sinais, não há concentração de toda a energia em um tempo curto. Como se trata de um sinal determinístico, sua reprodutibilidade é total, característica esta que também apresenta a técnica de MLS [4]. Contudo, ao utilizar-se da técnica de MLS, é necessário um processo de correlação cruzada entre os sinais de entrada e saída, enquanto que a utilização de um sinal de varredura não demanda correlação. A terceira vantagem consiste na possibilidade de utilização de pré-ênfases, compensando espectro não plano do ruído de fundo presente e permitindo a equalização do restante do equipamento de medição [5].



Figura 1: Posicionamento da fonte sonora onidirecional sobre o palco.

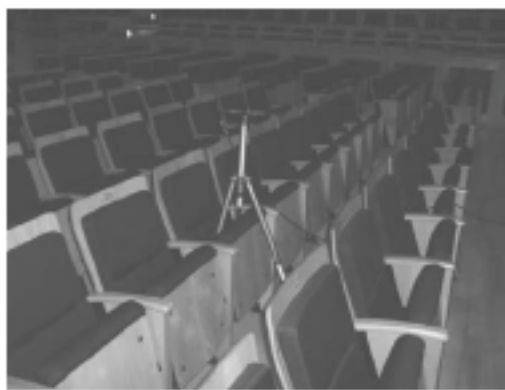


Figura 2: Posicionamento de um microfone com tripé

A sala foi excitada por meio de uma fonte onidirecional, constituída por um dodecaedro acoplado a um alto-falante de baixa frequência (woofers), posicionado sobre o palco, como mostrado na Fig. 1. Um filtro divisor de frequências (crossover) é encarregado de distribuir a energia pelos alto-falantes. A fonte foi alimentada, naturalmente, por amplificadores e o sinal de emissão (excitação) e imissão (aquisição) passaram por sistemas multiplexadores e placa AD/DA, esta última conectada a um microcomputador.

Toda a geração dos sinais e seu posterior pós-processamento foram executadas utilizando o software Monkey Forest para o tratamento de sinais em acústica de salas. Uma vez obtidas as respostas impulsivas para cada posição de microfone e cada configuração de teto, esses resultados eram armazenados para posterior determinação de curvas de decaimento e cálculo de parâmetros de qualidade acústica, tais como  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$ , CT, BR etc. [6;7]

A Fig. 2 ilustra o posicionamento de um microfone entre os assentos da platéia. A altura do microfone corresponde, em qualquer caso, à cota média do ouvido de uma pessoa sentada. A Fig. 3 indica o posicionamento da cabeça artificial, colocada na platéia. A Fig. 4 mostra o posicionamento da cabeça artificial no balcão do primeiro andar. As respostas binaurais, obtidas pelos microfones fixados na cabeça, foram também utilizadas para o cálculo da família de correlações cruzadas interaurais.

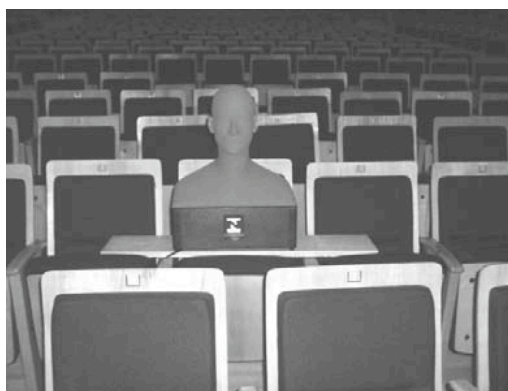


Figura 3: Posicionamento da cabeça artificial na platéia

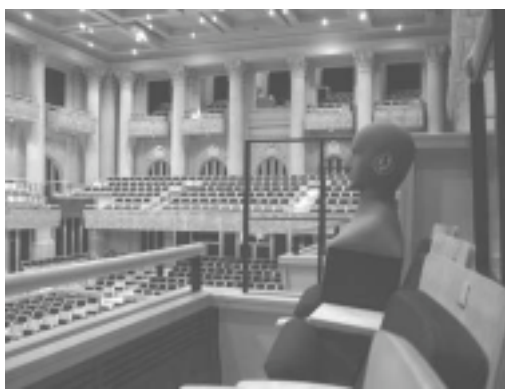


Figura 4: Posicionamento da cabeça artificial no balcão.

A Fig. 5 mostra a disposição dos microfones e da cabeça artificial no interior da sala. A cabeça artificial foi posicionada no assento G1 da platéia (posição 1) em todas as configurações de teto, exceto a configuração M, quando a cabeça foi colocada no camarote 9, assento 7 (posição 10).

Os microfones permaneceram nas posições indicadas na figura, segundo a nomenclatura adotada: platéia elevada E69 (posição 2), platéia O1 (posição 3), platéia elevada D2 (posição 4), mezanino D2 (posição 5), camarote 8 do primeiro pavimento, assento 12 (posição 6) e coro D23 (posição 7). Para os pontos no palco, foram medidos no fundo à esquerda, a uma distância de 1.0m do coro e 4.3m da lateral do palco (posição 8) e na frente à direita, a 8.2 m do coro e 4 m da lateral do palco (posição 9). Estas duas posições correspondem respectivamente à disposição da percussão e dos contra baixos em um espetáculo com grande orquestra.

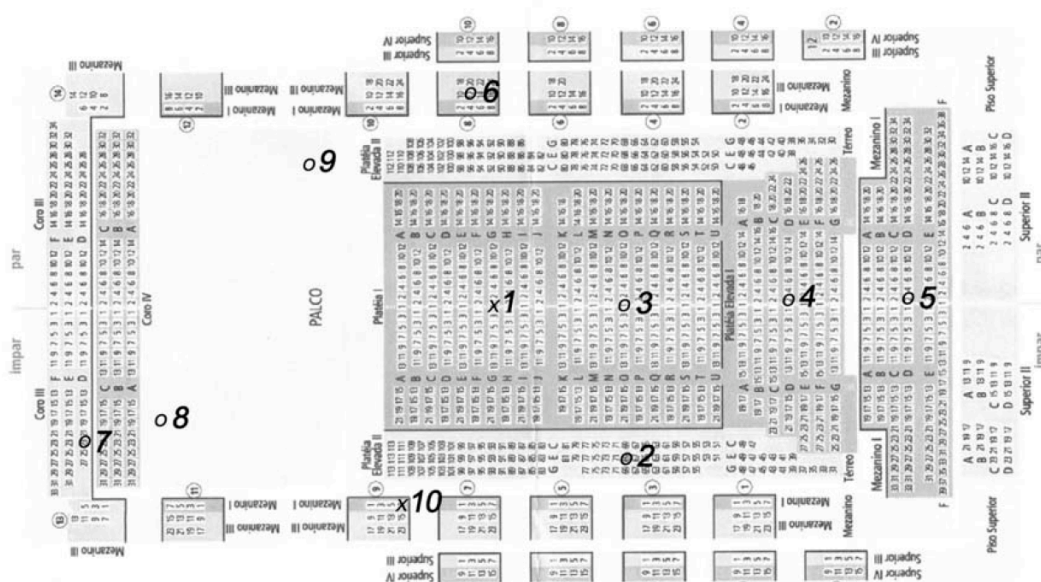


Figura 5: Planta geral dos assentos e posicionamento dos microfones.

### 2.3 Escolha e descrição das configurações de forro acústico adotadas

Seis diferentes configurações de forro acústico da Sala São Paulo, denominadas como configurações A, B, C, D, E e F foram selecionadas. Foi utilizada ainda uma sétima configuração, exclusivamente para obter-se a resposta binaural em um assento do camarote usualmente utilizado pelo diretor artístico da sala, denominada configuração M (ver Fig. 5). As configurações estão separadas em dois grupos. Em um primeiro grupo (A, B e F) estão as configurações sugeridas pela equipe de ensaio. No outro grupo (C, D, E e M) estão configurações que recentemente foram utilizadas em espetáculos na Sala São Paulo. Deu-se preferência a espetáculos mais recentes, favorecendo assim a experiência adquirida pelos músicos e técnicos da sala, que durante alguns anos de convívio a experimentação das configurações do forro acústico puderam desenvolver determinadas preferências dentre as infinitas possibilidades da Sala São Paulo.

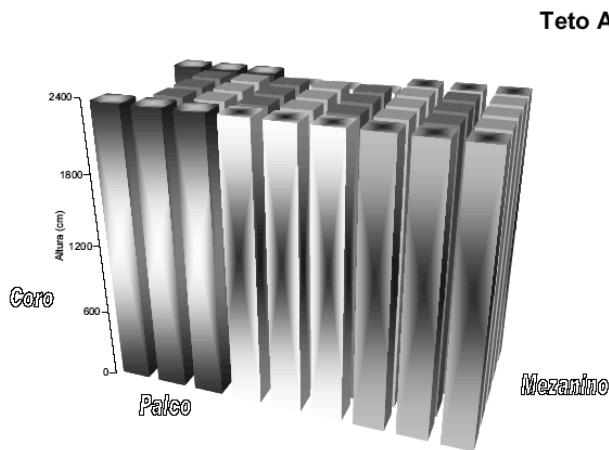


Figura 6: Configuração de teto A.

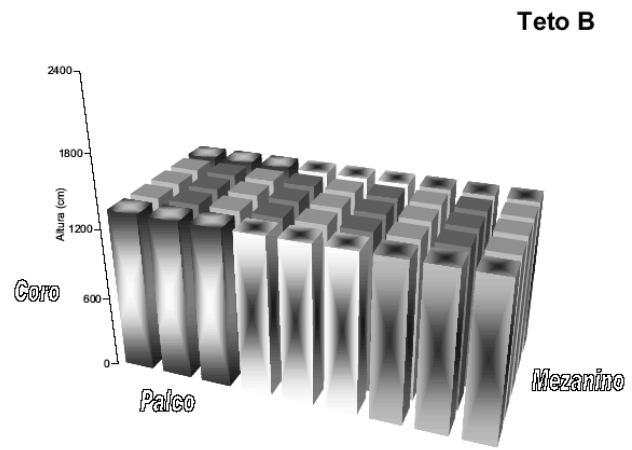


Figura 7: Configuração de teto B.

A Fig. 6 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração A. As barras verticais indicam o volume de ar sobre a platéia, sob cada placa. Nessa configuração, buscou-se maximizar o volume da sala. As placas estavam posicionadas de forma plana e horizontal, plano este situado em sua elevação máxima, cerca de 23.7 m, relativo ao nível do palco. Excetua-se o conjunto de placas P1 (à esquerda, na figura) que, por um impedimento mecânico, tem sua elevação limitada a 20.1 m. Esta é, portanto, a configuração de teto que resulta no maior volume admissível da sala.

A Fig. 7 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração B. Nessa configuração as placas formavam ainda um plano horizontal, porém na altura de 13.5 m, em uma posição mediana de suas possibilidades. Como esse nível corresponde a uma linha arquitetônica que circunda

horizontalmente a sala, esta adquire, nessa configuração, uma aparência natural, que sugere seu teto mais alto, embora este esteja rebaixado de 10.2 m.

A Fig. 8 ilustra o espaço disponível na sala para a configuração F. Aqui foi buscado o limite mیده altura das placas que ainda permite a utilização da sala. Nessa configuração as placas formam um plano horizontal a 8 m de altura, relativamente ao palco. Nessa configuração, os balcões do segundo andar ficam inutilizáveis pois permanecem acima do forro acústico. Ainda que nunca tenha sido utilizada essa configuração em performances musicais, é uma possibilidade que desejávamos investigar, colocando esse como um limite inferior de volume da Sala.

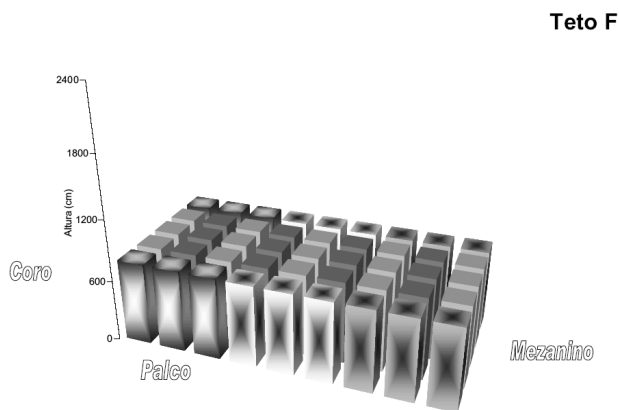


Figura 8: Configuração de teto F.

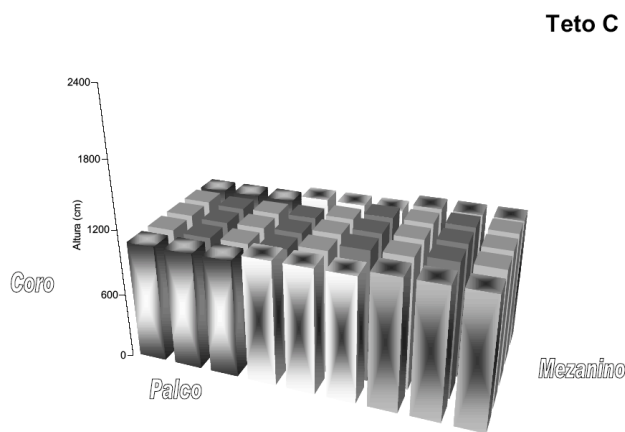


Figura 9: Configuração de teto C.

A Fig. 9 ilustra o posicionamento das placas na configuração C. Essa configuração foi utilizada em uma récita da Nona Sinfonia de Beethoven, com a OSESP sob a regência do maestro Roberto Minczuk, na abertura da temporada de 2004. Escolheu-se essa configuração por ter sido utilizada para a execução de uma obra para grande orquestra, inclusive coro, se tratando de uma disposição de interesse do ponto de escuta musical e acústico. A Nona Sinfonia é uma obra do fim do classicismo, que já contém elementos do romantismo em sua forma e instrumentação.

A Fig. 10 mostra o posicionamento das placas na configuração D. Essa configuração foi utilizada para a gravação da Segunda Sinfonia de Beethoven, com a OSESP sob a regência do maestro John Neshling. É uma obra com orquestração típica do período clássico e com o particular interesse de ter sido executada por um conjunto musical diferente - a orquestra clássica - em uma situação de gravação, também com a sala sem público, tal como no ensaio acústico.

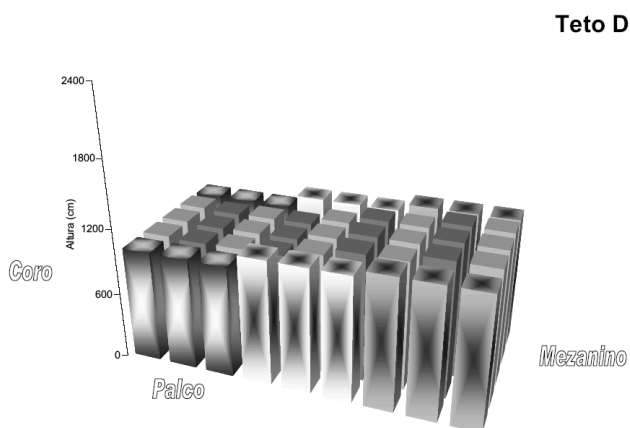


Figura 10: Configuração de teto D.

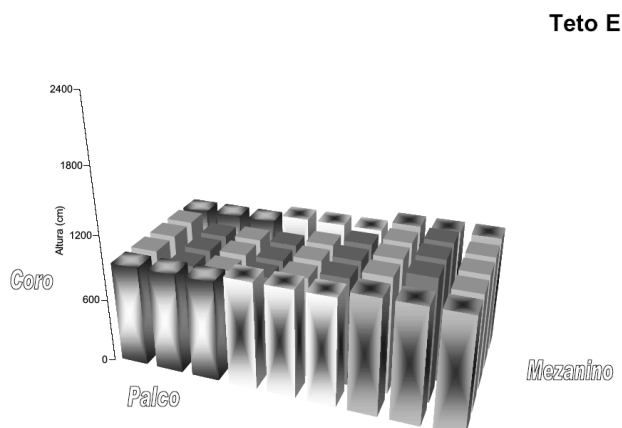


Figura 11: Configuração de teto E.

A Fig. 11 indica o posicionamento das placas na configuração E. Foi utilizada em um recital de música de câmara, onde foi interpretado o Quinteto para piano e cordas, KW116, de Mozart, com o pianista Stephen Kovacevich e músicos da OSESP. Aqui temos uma situação com um diferente conjunto musical, executando música do período clássico. A formação instrumental constou de 2 violinos, viola, violoncelo e piano.

Finalmente, a Fig. 12 ilustra o posicionamento das placas na configuração M. Essa configuração foi utilizada em uma récita da obra Pierrot Lunaire, de Arnold Schoenberg, regida pelo maestro John Neshling. A obra é de meados do século XX, representativa da ruptura buscada por

compositores desse período. Nessa obra, o conjunto musical é totalmente não convencional se comparado com o instrumental sinfônico ou de câmara tradicionais.

Teto M

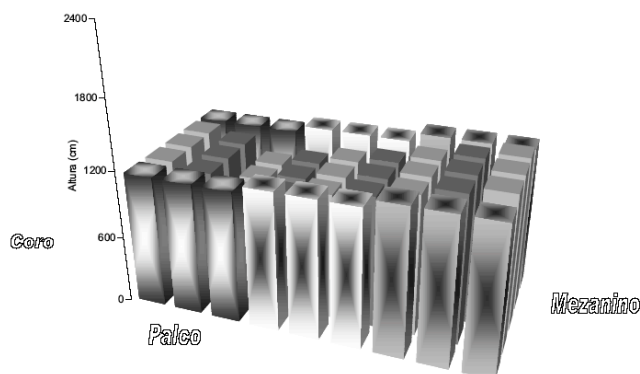


Figura 12: Configuração de teto M.

## 3. RESULTADOS OBTIDOS

O primeiro aspecto a ser observado é a variabilidade ou dispersão dos resultados obtidos para uma mesma configuração de teto nas diferentes posições dos microfones. As Figs. 13 a 16 mostram os resultados para  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$  e CT, por banda de oitava, de 63 Hz a 8 kHz, para seis posições de microfones, na configuração C.

Nas quatro figuras, observa-se uma curva indicando a média do parâmetro de qualidade acústica. Para os parâmetros  $T_{30}$  e EDT a média é calculada a partir da média RMS das respostas impulsivas filtradas de cada posição de microfone. Essa opção metodológica deve-se ao fato de que, principalmente em baixas frequências, as respostas impulsivas integradas não serem propriamente retilíneas, sofrendo forte influência dos modos da sala. Essa opção produz resultados mais estáveis do que a simples média aritmética dos valores dos decaimentos em cada posição de microfone. Para as curvas de  $C_{80}$  e CT, as médias indicadas constituem a média aritmética simples dos valores do parâmetro em questão.

### 3.1 Influência da posição do ouvinte

O gráfico de  $T_{30}$ , Fig. 13, mostra que essa variabilidade com a posição é pequena, exceto na banda de 63 Hz, o que indica uma boa difusão na sala. Na banda de 63 Hz, a dispersão dos resultados era esperada, uma vez que estamos em pleno domínio modal, onde a posição do ouvinte exerce influência notável no tempo de reverberação medido. Nesta, assim como nas demais figuras, cada curva corresponde a um ponto de medição.

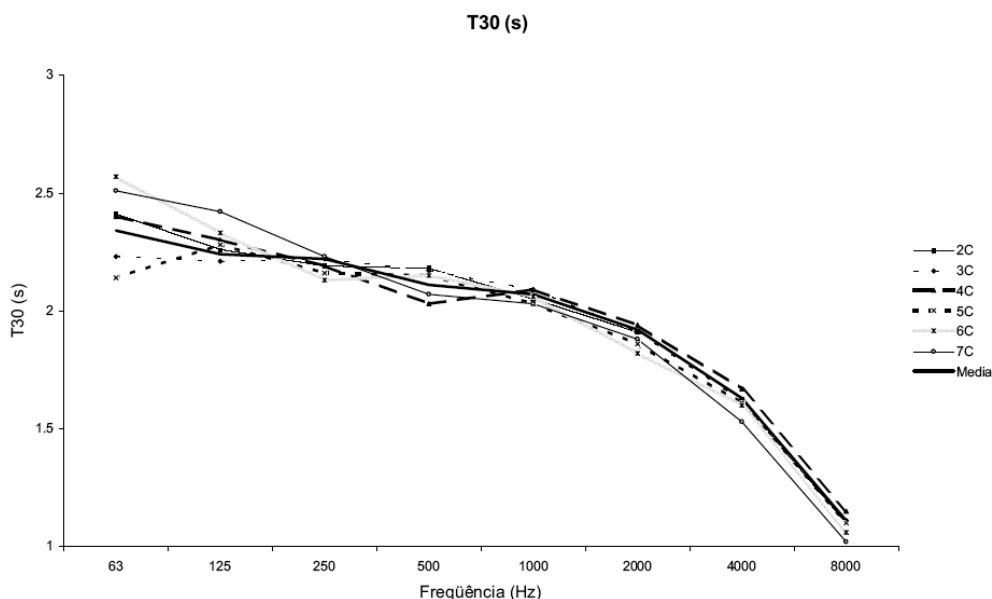


Figura 13:  $T_{30}$  nas diversas posições de microfones na configuração de teto C.



No caso do EDT, Fig. 14, há uma maior variabilidade em função de uma maior ou menor presença de primeiras reflexões, dependendo estas da posição onde se encontra o ouvinte. Com efeito, na banda de 500 Hz, o microfone 7 (coro) registrou um tempo de decaimento inicial de 1.8 s, enquanto no microfone 4 (platéia elevada) esse tempo foi avaliado em 2.26 s.

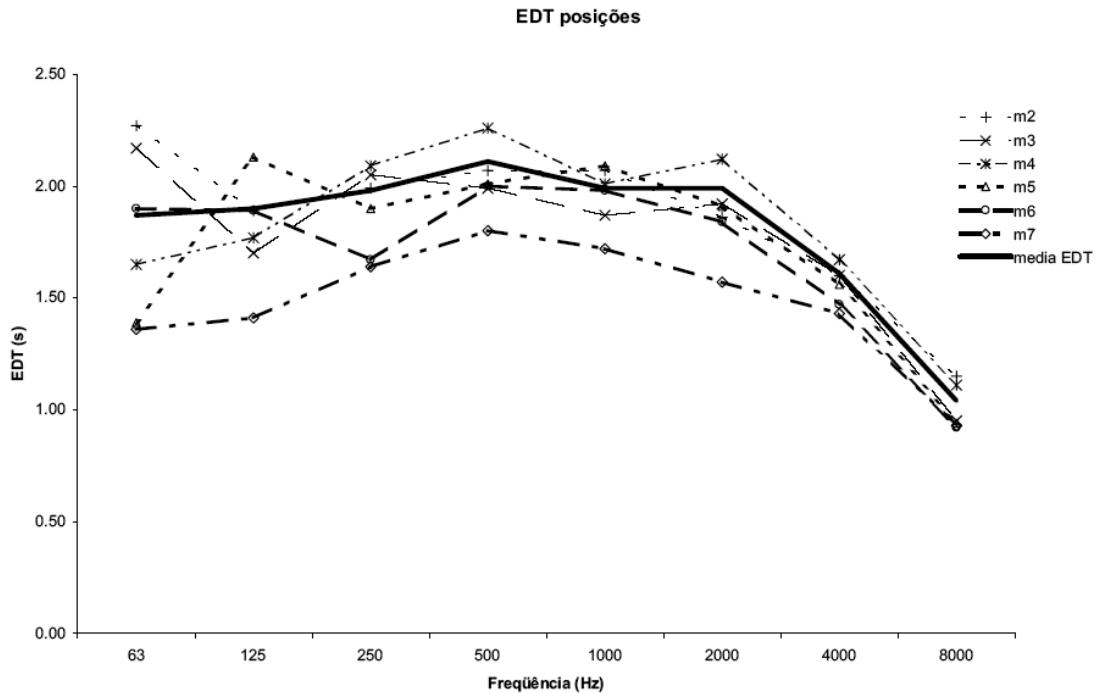


Figura 14: EDT nas diversas posições de microfone na configuração de teto C.

Quanto ao gráfico da clareza, Fig. 15, observa-se que, embora haja pequena variação de  $C_{80}$  com a frequência, há uma variância significativa com a posição do ouvinte. Dentre as posições medidas, a que apresenta maior índice de clareza é o assento 12 do camarote 8 (microfone 6). Observe-se adicionalmente que o índice de clareza no assento D 23 (microfone 7), no coro, também é alto. Esse padrão é mantido nas outras configurações de teto ensaiadas.

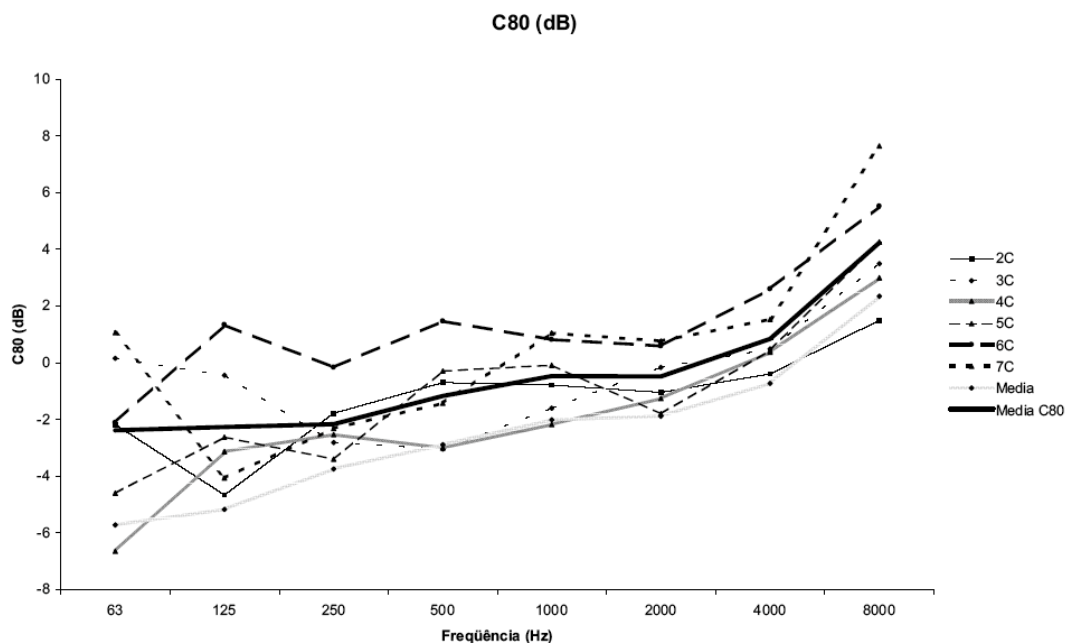


Figura 15:  $C_{80}$  nas diversas posições de microfone na configuração de teto C.

O gráfico de CT, Fig. 16, confirma o fato de que as posições 6 e 7, com maior clareza, são aquelas que apresentam menor valor de CT, como é usual. Note-se a dispersão significativa nos valores apresentados.

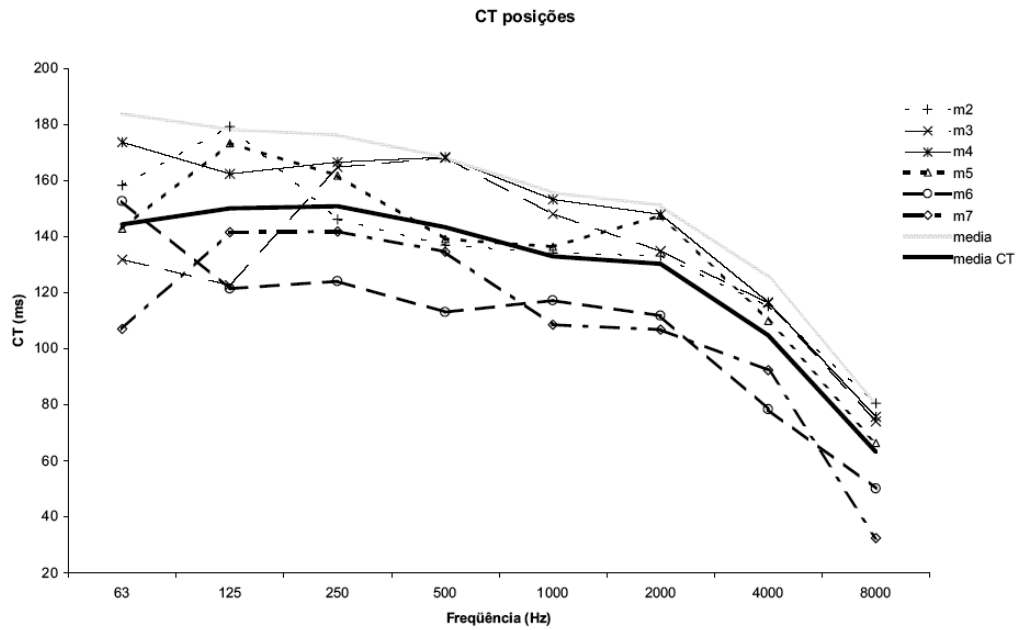


Figura 16: CT nas diversas posições de microfones na configuração de teto C.

As Figs. 17 a 20 ilustram os resultados correspondentes ao  $T_{30}$ , EDT,  $C_{80}$  e CT, para as seis posições de microfones, na configuração E.

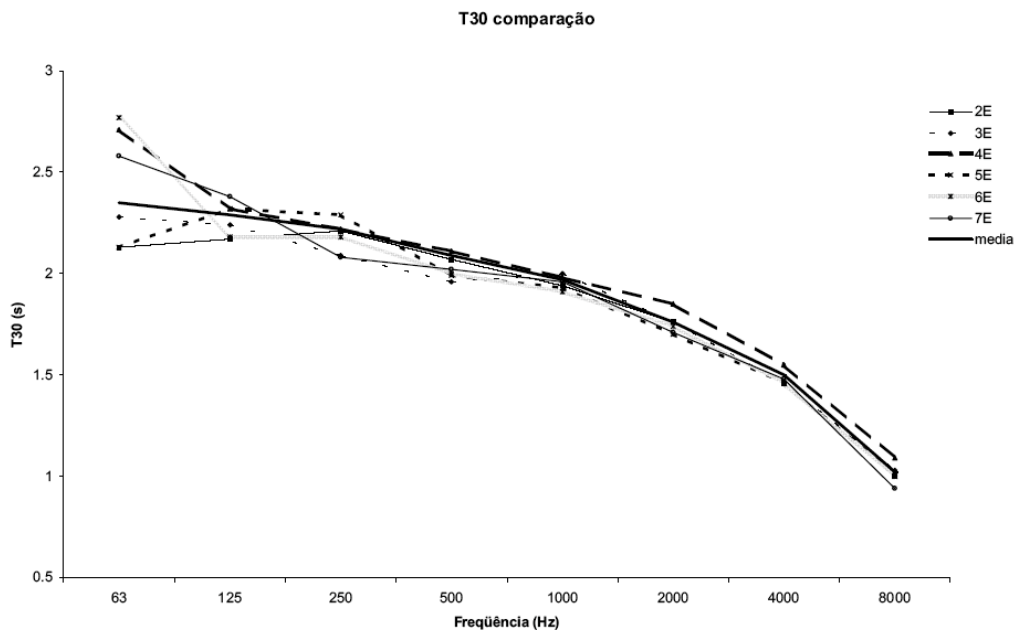


Figura 17:  $T_{30}$  nas diversas posições de microfones na configuração de teto E.

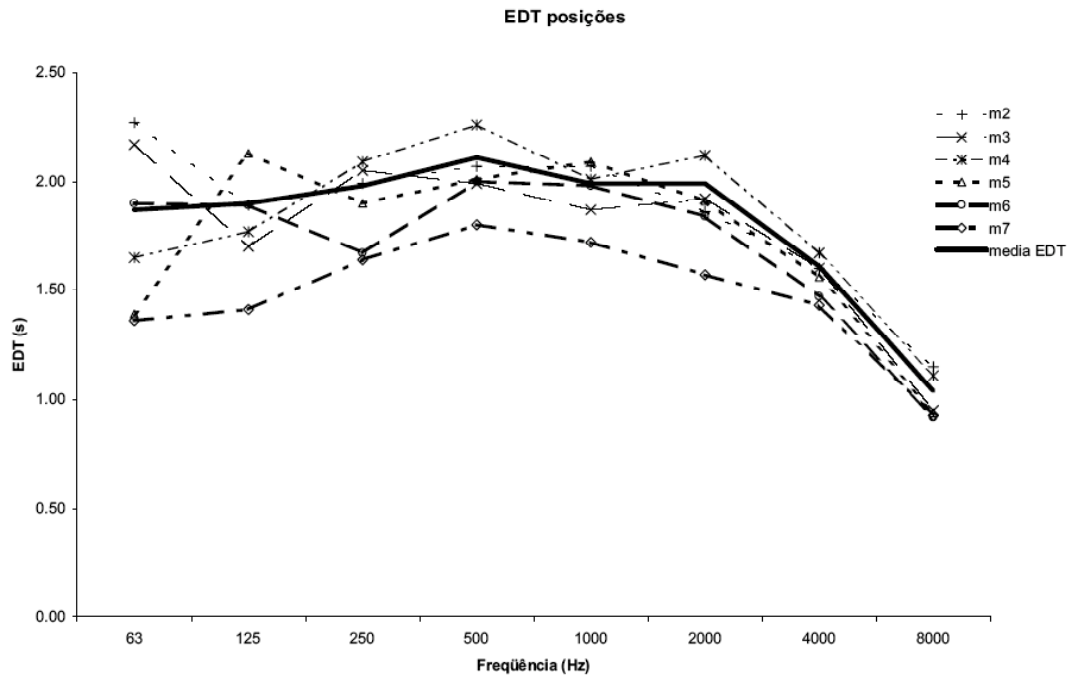


Figura 18: EDT nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

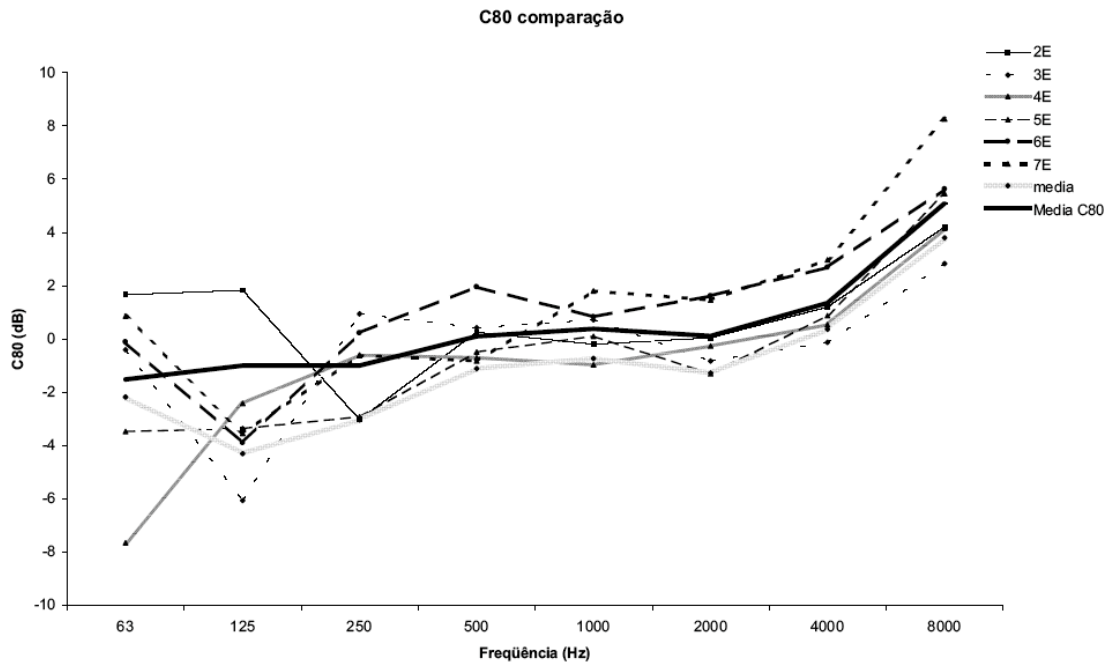


Figura 19: C<sub>80</sub> nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

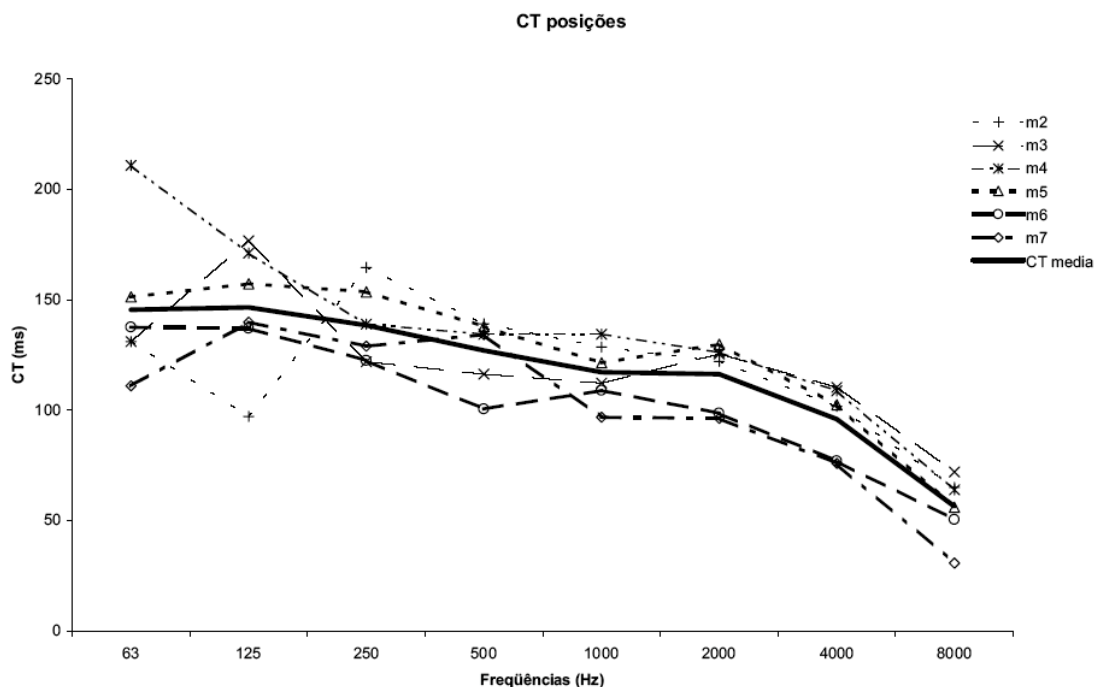


Figura 20: CT nas diversas posições de microfone na configuração de teto E.

O gráfico de  $T_{30}$  mostra comportamento similar ao da Fig. 13, com pequena sensibilidade à mudança da posição na sala e o esperado decaimento com a frequência. Naturalmente, como na configuração E a sala apresenta menor volume, todos os valores de  $T_{30}$  encontrados são inferiores aos da Fig. 13. Observando-se o gráfico de EDT, Fig. 18, é notável que, nessa configuração de teto, há uma menor dispersão entre os resultados comparativamente aos indicados na Fig. 14. Obviamente, os valores absolutos de EDT são um pouco inferiores. Quanto ao índice de clareza, Fig. 19, a variância com a posição do microfone é aproximadamente a mesma, indicada pela Fig. 15. Os dois assentos que apresentam maior clareza continuam sendo os correspondentes às posições 6 e 7, tal como na configuração vista anteriormente. Finalmente, com relação ao CT, Fig. 20, o que podemos notar, claramente, é que na configuração E as coordenadas temporais do centróide da resposta impulsiva são inferiores aos valores correspondentes obtidos na configuração C.

### 3.2 Influência da configuração de teto

Uma vez verificada a consistência e coerência dos resultados, o segundo aspecto a ser explorado é a variação da média espacial dos parâmetros acústicos com as diversas configurações de teto ensaiadas, o que é ilustrado nas Figs. 21 a 24.

O gráfico de  $T_{30}$ , Fig. 21, mostra uma variação de cerca de 1.5 s no tempo de reberação. Com efeito, na configuração A, onde o volume da sala é de cerca de 25000 m<sup>3</sup>, o  $T_{30}$  chega a 3.26 s, na banda de frequência de 250 Hz. Na configuração B, cujo volume corresponde a cerca de 13900 m<sup>3</sup>, o tempo de reverberação em 1 kHz é de cerca de 2.4 s. Nas configurações subsequentes (C, D, E e F), a variação de  $T_{30}$  é pequena, indo de 2.07 s (C) a 1.85 s (F). Com efeito, estas configurações têm diferentes formas porém volumes próximos.

A Fig. 22 nos mostra um resultado substancialmente distinto para o decaimento inicial medido. Enquanto o tempo de reverberação não apresentou grande sensibilidade à variação de configuração de teto, com exceção da configuração A, os resultados comparativos de EDT mostram haver extrema sensibilidade desse parâmetro para com as diversas configurações de teto. Tomando como exemplo a frequência de 500 Hz tem-se os seguintes valores de EDT, em segundos: A, 3.42; B, 2.47; C, 2.11; D, 2.09; E, 1.83 e F, 1.57, ou seja, os valores de EDT acompanham notadamente a redução de volume da sala. Essa sensibilidade é a grande responsável pela eficácia do teto móvel como elemento de afinação da Sala São Paulo, como veremos na seção seguinte.

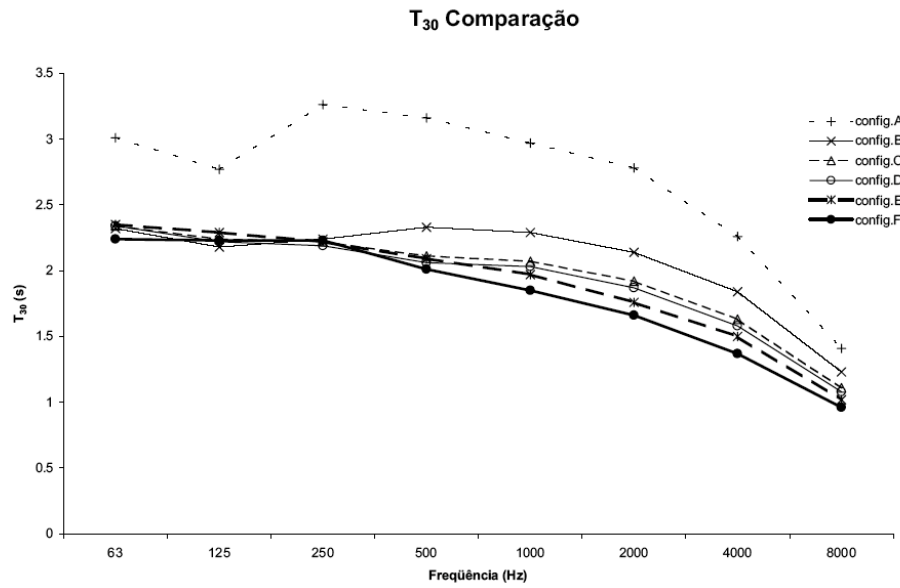


Figura 21: Comparação de T<sub>30</sub> entre as configurações de teto ensaiadas.

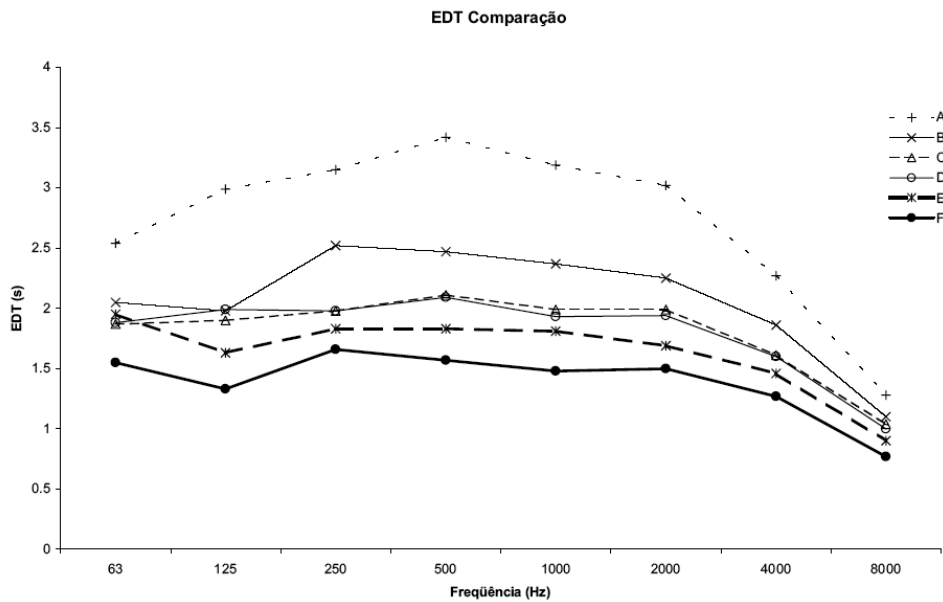


Figura 22: Comparação de EDT entre as configurações de teto ensaiadas.

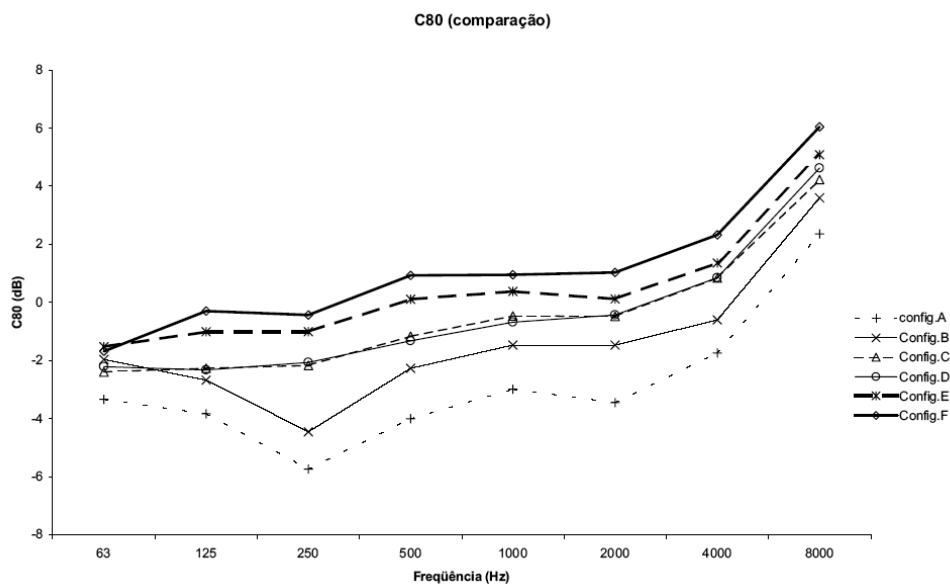


Figura 23: Comparação de C<sub>80</sub> entre as configurações de teto ensaiadas.

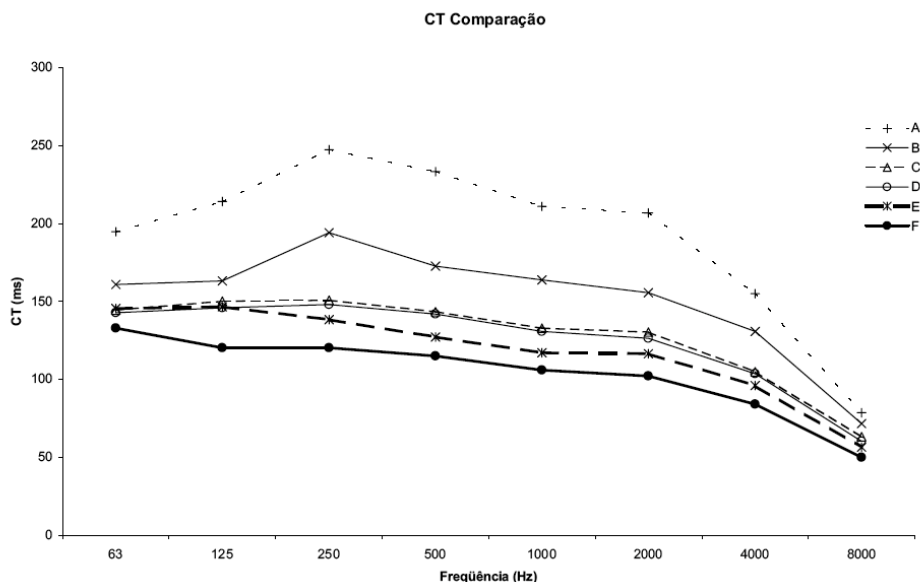


Figura 24: Comparação de CT entre as configurações de teto ensaiadas.

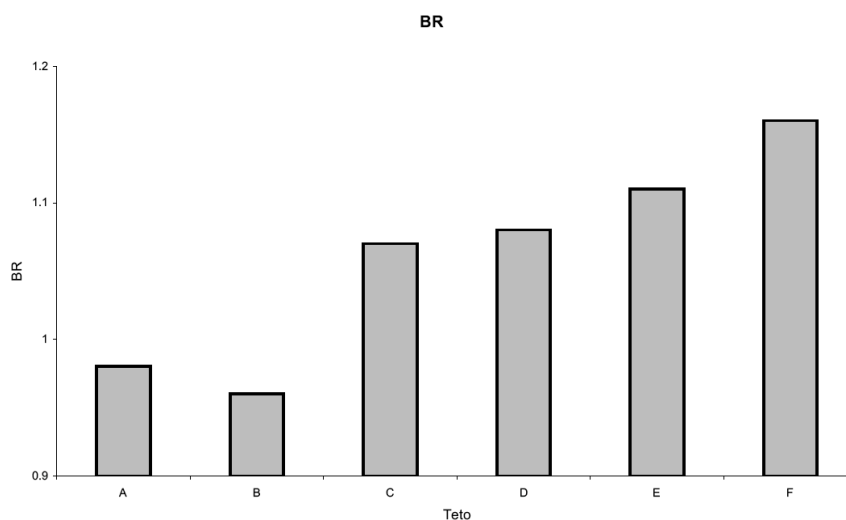


Figura 25: Comparação de BR entre as configurações de teto ensaiadas.

Os valores comparativos de C80 estão apresentados na Fig. 23. Como já visto anteriormente, as curvas são quase monotonamente crescentes com a frequência, com exceção das configurações A e B, onde há um mínimo em 250 Hz. Observa-se uma razoável sensibilidade do índice de clareza às configurações de teto, variando aquele de mais de 4dB na frequência de 500 Hz, por exemplo. As curvas acompanham de forma consistente a redução do volume da sala, apresentando maior clareza para menores volumes, como era de se esperar.

Os resultados do tempo central, CT, estão apresentados na Fig. 24. Vê-se que em 1 kHz os valores flutuam entre 106 ms (F) e 211 ms (A), uma relação de praticamente 2:1. Esse quadro ilustra as diferenças encontradas nas respostas impulsivas (médias espaciais) da sala nas diversas configurações de teto. A exemplo dos demais parâmetros, o tempo central acompanha consistentemente a variação de volume da sala.

A Fig. 25 indica os valores da razão de baixos, BR, para as seis configurações. Excetuando-se a configuração B, tem-se uma razão de baixos que varia inversamente com o volume da sala. Para configurações intermediárias, geralmente utilizadas em concertos, BR varia entre 1.07 (C) e 1.11 (E). O parâmetro de qualidade acústica objetivo BR é usualmente associado à impressão subjetiva denominada “calor” de uma sala. Quanto maior o BR, maior será sua resposta nos graves e maior será a sensação de “calor” da sala.

### 3.3 Correlação cruzada inter-aural

Um dos parâmetros de maior importância na avaliação da qualidade acústica de uma sala é a família das correlações cruzadas interaurais, IACC, dentre as quais privilegiaremos a IACC<sub>L</sub> e a

IACCE. O L, referindo-se a tardio (*late*), ou seja, no intervalo de tempo após 80 ms, contado da chegada do som direto, e o E, referindo-se a precoce ou inicial (*early*), ou seja, no intervalo entre 0 e 80 ms. A avaliação de IACC foi obtida a partir dos sinais medidos com uma cabeça artificial para levantar a resposta impulsiva binaural, conforme descrito na Seção 2. Para todas as configurações de teto a posição da cabeça artificial foi mantida. Uma medição adicional foi realizada na configuração denominada M, em posição distinta, como já mencionado.

Um dos atributos de qualidade acústica de uma sala refere-se ao som reverberante atingindo o ouvinte como se fosse proveniente de todas as direções, qualidade subjetiva esta usualmente denominada envolvimento do ouvinte (LEV - *Listener Envelopment*). Esse atributo tem sido associado à correlação cruzada interaural tardia, na forma  $1 - IACCL$ , ou seja, quanto menor for a correlação cruzada interaural tardia, maior será o envolvimento do ouvinte.

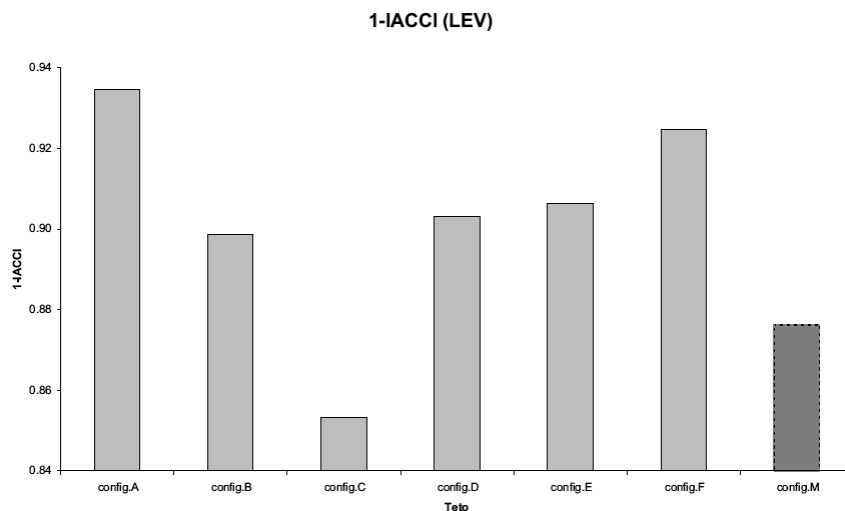


Figura 26: Envolvimento do ouvinte, LEV, estimado por  $1 - IACCL$ .

A Fig.26 indica o valor de  $1 - IACCL$  para as sete configurações de teto, obtidos a partir de médias nas bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1 e 2 kHz. Observa-se que todos os valores estão compreendidos na faixa que se situa entre 0.85 e 0.94, valores altos portanto. Isso se deve, evidentemente, ao alto grau de difusão sonora que a sala promove, devido a irregularidades, ornamentos, colunas etc., presentes na Sala São Paulo. Não se evidencia nenhuma correlação entre volume da sala e o valor do parâmetro  $1 - IACCL$ .

Outro atributo de qualidade acústica de suma importância é dado pelo atributo de espacialidade da sala que é primordialmente avaliada por um parâmetro subjetivo denominado tamanho aparente da fonte (ASW - *Apparent Source Width*). Desse modo, quanto maior o tamanho aparente da fonte, maior sensação de espacialidade a sala oferece, dando “corpo” à música. A melhor forma disponível até o momento de se avaliar o ASW é a partir da correlação cruzada interaural precoce, pela expressão  $1 - IACCE$ , ou seja, quanto menor for a correlação cruzada interaural precoce, maior será o ASW, indicando melhor qualidade da acústica sala.

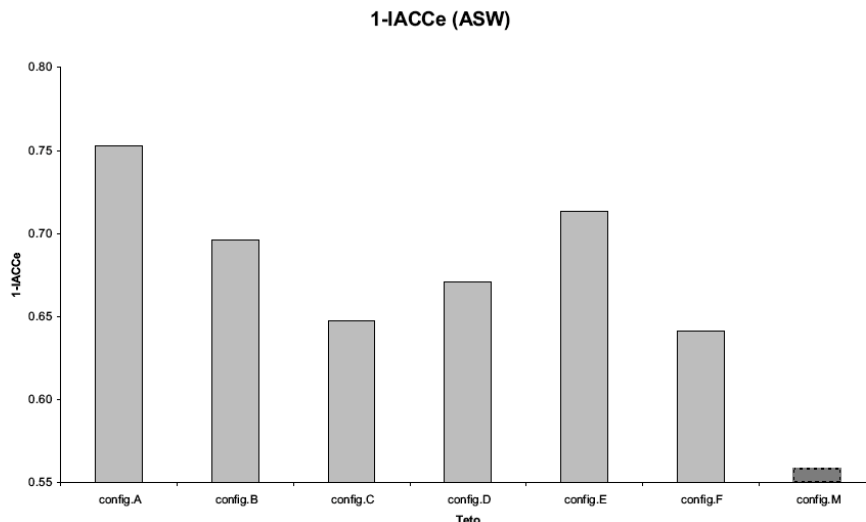


Figura 27: Tamanho aparente da fonte, estimado por  $1 - IACCE$ .

A Fig. 27 indica o valor de  $1-IACC_E$  para as sete configurações de teto, obtidos a partir de médias nas bandas de oitava de 500 Hz, 1 e 2 kHz. Esse parâmetro também é referido por alguns autores como índice de qualidade binaural, (BQI - *Binaural Quality Index*). Os valores obtidos, excetuando-se a configuração de teto M, situam-se entre 0.63 e 0.76, valores considerados no limite superior para salas de concerto.[8;9] Curiosamente, na configuração de teto M esse valor decaiu para 0.55. Isso tem pelo menos uma explicação plausível. Nessa configuração, como já mencionado, a posição da cabeça artificial foi modificada, passando para um assento de camarote, lateral portanto, onde se verifica menor tamanho aparente da fonte, ou seja menor sensação de espacialidade. Como esta não foi uma configuração de teto de volume mínimo (D, E e F apresentam volume menor) outros fatores devem ser ainda investigados para fundamentar a explicação.

## 4. ANÁLISE QUALITATIVA

Esta seção apresenta dois tipos de exame dos parâmetros obtidos no ensaio acústico realizado na Sala São Paulo de concertos. Em uma primeira etapa os dados da sala são comparados àqueles, disponíveis na literatura, das três salas de concerto qualificadas como Superiores - A+, segundo o critério de Beranek [6] – por críticos e músicos, nominalmente: *Concertgebouw*, em Amsterdã; *Synphony Hall*, em Boston; e *Grosser Musikvereinssaal*, em Viena. Análises comparativas entre salas de concerto, sob a ótica de seus atributos de qualidade acústica, vêm sendo publicadas na literatura especializada. [10;8] Para as comparações analisadas neste trabalho, são apresentados os gráficos dos parâmetros acústicos em consideração por banda de oitava, nas bandas de 125 a 4000 Hz, para cada uma das salas citadas e para cinco configurações de teto da Sala São Paulo, a saber: configuração

A (teto mais alto); configuração F (teto mais baixo); e configurações C, D e E (teto intermediário). As curvas para as configurações A e F delimitam dois extremos da faixa de operação da Sala.

Na segunda parte da análise, os parâmetros acústicos são relacionados com o gênero musical, grupo instrumental ou opção interpretativa dos maestros, uma vez que, no caso da Sala São Paulo de concertos, identifica-se uma relação entre preferências estéticas e os valores que os parâmetros de qualidade acústica assumem em função da configuração adotada.

### 4.1. Análise comparativa com salas reconhecidas mundialmente

Inicialmente, vale considerar os resultados comparativos entre as três salas citadas acima e a Sala São Paulo no que diz respeito ao tempo de reverberação, indicado na Fig. 28. Todos os dados são para salas desocupadas.

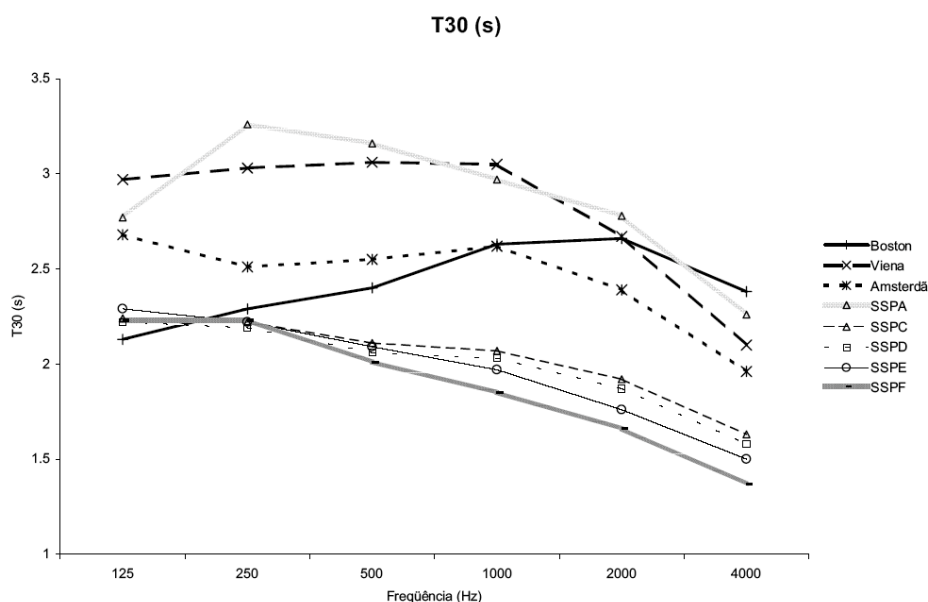


Figura 28:  $T_{30}$  comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.



Observa-se que a região onde opera a Sala São Paulo de concertos compreende uma faixa onde situam-se as três salas tomadas como referência. Com efeito, os limites superior (A) e inferior (F) das curvas de  $T_{30}$  englobam as três salas de referência. Contudo, nas configurações mais utilizadas (C, D e E), apresenta tempos de reverberação inferiores, especialmente em alta frequência, como mostra a figura. Devemos lembrar, contudo, que esses resultados comparativos são para salas desocupadas, mesma condição em que foram efetuados os ensaios na Sala São Paulo. Uma vez que os resultados não podem ser extrapolados para salas plenamente ocupadas, condição usual dos espetáculos, pouco se pode afirmar quanto aos tempos de reverberação da Sala São Paulo de concertos para as diversas configurações, comparativamente às salas de referem condição de concerto. Este comentário vale, naturalmente, para os outros quadros comparativos.

O EDT é um parâmetro de qualidade acústica de grande influência na apreciação musical. Observa-se que as três salas consideradas superiores, apresentam EDT na faixa entre 2 e 3 s em toda a gama de frequências. Como se pode observar da Fig. 29, com exceção das configurações A e B (veja também a Fig. 22), todas as outras mostram um resultado de EDT inferior, na faixa de 1.3 a 2.1 s.

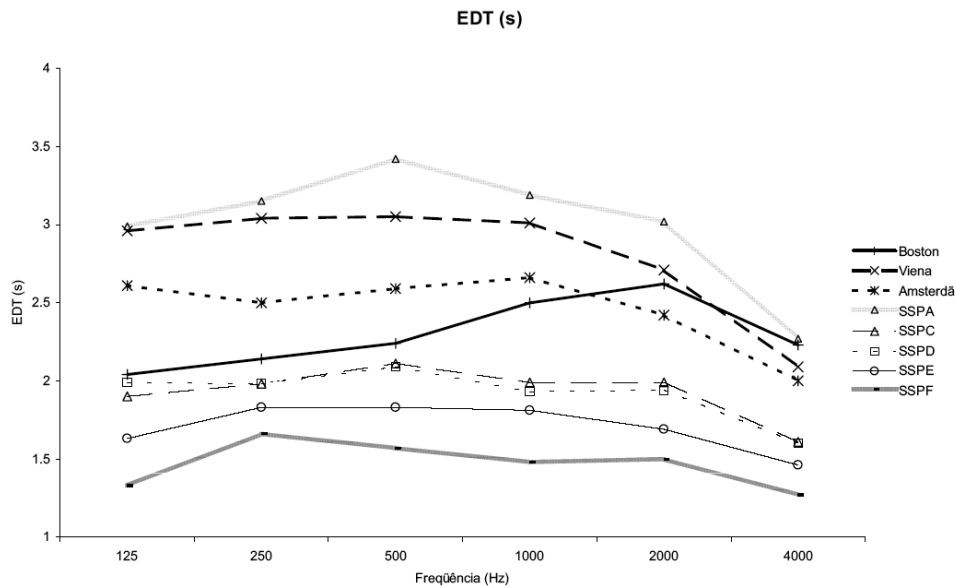


Figura 29: EDT comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

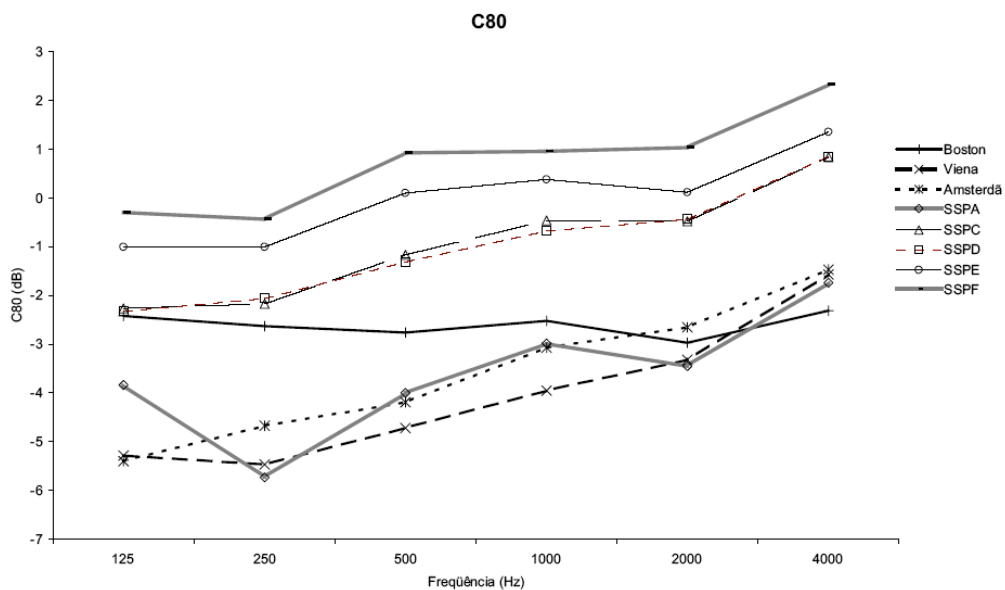


Figura 30:  $C_{80}$  comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

A Fig. 30 apresenta os resultados comparativos para o índice de clareza, sempre em banda de oitava entre 125 e 4000 Hz e para as salas desocupadas. Observa-se que, para a configuração de

teto A, o índice de clareza situa-se bem proximamente aos da sala de Viena e de Amsterdã. Para as demais, contudo, os índices de clareza mostram valores acima aos das salas de referência. Note-se que a curva de  $C_{80}$  para a configuração de teto E varia entre -1 dB em 125 Hz e 1.4 dB em 4 kHz, uma clareza excepcionalmente alta. Os dados para CT das salas de referência não estão disponíveis na literatura, não sendo portanto possível a comparação.

A seguir, veremos como se comporta a Sala São Paulo comparativamente às salas tomadas como referência no que toca à razão de baixos, BR. A Fig. 31 mostra essa comparação. A razão de baixos das três salas, situa-se entre 1.03 (Boston) e 1.11 (Viena). As configurações de teto A e B da Sala São Paulo apresentam valores de BR inferiores, da ordem de 0.97, enquanto as configurações de teto C, D e E apresentam valores de BR quase idênticos aos das salas de referência. A configuração F, entretanto, pode ser considerada uma sala “mais quente”, com um valor de BR igual a 1.16.

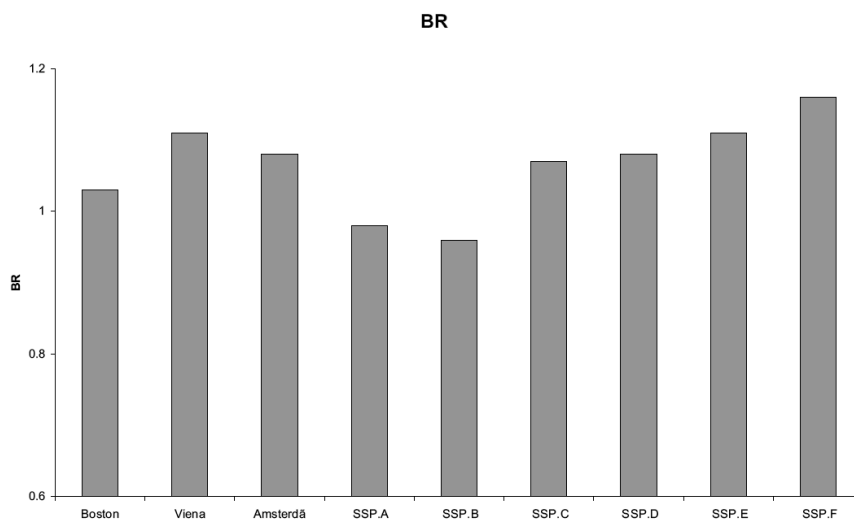


Figura 31: BR comparado entre a Sala São Paulo e as salas de referência.

### 4.2. Análise do ponto de escuta musical

As três salas utilizadas como referência comparativa, datam do período musical conhecido como Romantismo. A música sinfônica composta nesse período privilegia o atributo subjetivo denominado preenchimento do som (*fullness of tone*), com uma busca de imersão completa do ouvinte nas geralmente longas linhas melódicas executadas pelas grandes orquestras românticas. Esse preenchimento pode ser alcançado em salas com um valor de EDT mais elevado, tipicamente entre dois e três segundos, como ocorre com as salas românticas mundialmente reconhecidas como superiores, tomadas como referências anteriores. Um valor de EDT menor privilegia um gênero musical em que são mais frequentes melodias com transientes rápidos, típicos da música do período conhecido como Clássico.[11] Dentre as configurações ensaiadas, as A e B são aquelas que apresentaram valores de EDT que condizem com os valores requeridos pela música operária romântica. Por outro lado, as configurações C, D e E, apresentam valores médios do parâmetro EDT que qualificam a Sala São Paulo de concertos para execução de música do período clássico. Para essas três configurações, o decaimento inicial é baixo o bastante para permitir passagens musicais com transientes mais velozes. Com efeito, a configuração C foi a adotada para a execução da Nona Sinfonia de Beethoven; a configuração D foi aquela adotada para a execução da Segunda Sinfonia de Beethoven; e a configuração E foi a adotada para a execução de um Quinteto para piano e cordas de Mozart.

O alto índice de clareza encontrado na Sala São Paulo apresenta algumas vantagens do ponto de escuta musical. Primeiramente, em melodias com transientes velozes ou ritmos acelerados, um alto índice de clareza permite maior inteligibilidade musical, sem mistura, ou seja, sem “embolamento” sonoro. Como um exemplo, as músicas contemporâneas com importante parte percussiva, tal como a Sagração da Primavera, de Igor Stravinsky [12], requerem um  $C_{80}$  alto, de modo que o ouvinte não perca a fidedignidade, principalmente rítmica, de certas passagens. A Sala São Paulo de concertos apresenta, com frequência, peças de canto coral. O alto índice de clareza encontrado auxilia na inteligibilidade, inclusive da palavra, em obras para canto coral ou para cantor solista e orquestra.

Dentre todos os períodos da história musical, é o Barroco que vai possuir uma relação mais forte entre as composições e a variação dos valores do tempo de reverberação. No Barroco, não havia padronização no que diz respeito aos espaços onde se ouvia música. Assim, a variação dos parâmetros acústicos que os dados da Sala São Paulo mostram, possibilita a adequação desta para os variados tempos de reverberação ideais em cada obra. Os compositores nesse período exerciam

seu ofício em salas acusticamente distintas, geralmente igrejas e capelas que não foram erguidas segundo uma única norma arquitetônica que unificasse as construções.[13] Segundo especialistas na música barroca [14], os valores ideais de  $T_{30}$  são dados pela velocidade das mudanças harmônicas dentro de cada obra. Uma sala que possibilita a mudança de seus parâmetros acústicos oferece aos músicos a opção de adequar a sala à sua interpretação da música - e não o contrário. Como exemplo, a configuração A com  $T_{30}$  em torno de 3 s, estaria mais adequada a uma música barroca cujas mudanças harmônicas fossem mais lentas, como em boa parte da obra de Vivaldi; enquanto que, por exemplo, a obra de Bach, que freqüentemente apresenta mudanças harmônicas mais velozes, soaria melhor nas configurações B, C, D e E, com tempos de reverberação em torno de 2 s.

Devido à natureza do instrumental barroco, que possui, em geral, pequena potência de emissão sonora, dentre todas as configurações de teto ensaiadas, talvez a configuração F, devido ao seu menor valor de  $T_{30}$  e por impor uma redução no número de ouvintes na sala, fosse a mais indicada para a performance de música barroca, com rápidas mudanças harmônicas, principalmente em uma interpretação com instrumentos de época.

## 5. CONCLUSÕES

As respostas impulsivas da Sala São Paulo de concertos, desocupada, para uma posição da fonte, oito posições de microfone e sete distintas configurações de teto foram levantadas utilizando a técnica de varredura em freqüência com preservação de informação de fase. Adicionalmente, uma cabeça artificial foi utilizada para obter as respostas impulsivas binaurais para cada uma das configurações de teto escolhidas. Com base nessas medições, as curvas de decaimento, o tempo de reverberação,  $T_{30}$ , o tempo de decaimento inicial, EDT, o índice de clareza,  $C_{80}$ , o tempo central, CT e a razão de baixos, BR, foram calculados para cada posição de microfone e cada configuração de teto. Além disso, as correlações cruzadas interaurais precoce,  $IACCE$ , e tardia,  $IACCL$ , foram avaliadas para a posição da cabeça artificial, em cada configuração de teto.

Essencialmente, os resultados mostraram que todos os parâmetros de qualidade acústica são sensíveis às variações de configuração de teto, sendo essa sensibilidade menor para o tempo de reverberação e maior para o tempo de decaimento inicial, para o índice de clareza e para o tempo central. A razão de baixos, que indica o "calor" da sala, também mostrou-se bastante sensível às modificações de forma e volume. Isso nos permite concluir que a afinação da sala a partir de seu forro móvel é efetiva, estando inclusive de acordo com o "ponto de escuta" acústico, algumas das escolhas de configuração adotadas pelos músicos.

Na comparação dos atributos de qualidade acústica da Sala São Paulo de concertos com os das outras três salas classificadas como superiores (A+), verificou-se que, para as configurações de teto medidas e já utilizadas em espetáculos (C, D e E), a Sala apresenta tempos de reverberação ligeiramente menores (tipicamente 2.0 s em 1 kHz), com um decaimento um pouco mais acentuado em altas freqüências. O mesmo sucede com o EDT, (tipicamente 1.7 s em 1 kHz), o que indicaria um julgamento subjetivo de menor reverberação.[5] Esse resultado é também compatível com um fator de clareza ligeiramente mais elevado que a maioria das salas de referência. No que toca à razão de baixos, a Sala São Paulo é inteiramente equivalente às salas de referência.

As contingências de natureza arquitetônica da Sala São Paulo de concertos, tais como suas proporções similares, por exemplo, às da Boston Symphony Hall [7] ou às suas características amplamente difusoras são oriundas, em grande parte, de características do espaço disponível para sua construção. Mas a decisão de garantir, por exemplo, seus balcões com superfícies difusoras, ajudaram a dar à Sala São Paulo as características de "boa acústica", de que falamos no início. O forro móvel é um recurso adicional que permite efetivamente afinar a Sala, ajustando-a a estilos musicais tão distintos como o Romantismo, o Classicismo, e a música Contemporânea. Até que ponto esse ajuste pode ser otimizado ainda é precoce afirmar, sendo necessário um conjunto bem maior de ensaios - especialmente testando outras configurações de teto. Contudo, ao que tudo indica, os critérios *ad hoc* dos músicos parecem vir tendo razoável sucesso. Alguns aspectos sobre o conjunto da sala, extraídos das medições adicionais feitas por microfones situados no palco também necessitam análise mais cuidadosa.

Dentre os atributos da Sala São Paulo de concertos um dos mais importantes é justamente o forro móvel que permite a Sala apresentar qualidades acústicas variáveis. Nas tentativas encontradas na literatura de classificação de salas de concerto segundo categorias (ranqueamento), pouco se leva em consideração o estilo musical mais adequado aos atributos de qualidade acústica da sala. Contudo, sabe-se que uma sala construída no período romântico não é estritamente adequada à execução de música do período clássico, por exemplo. No caso da Sala São Paulo, há a possibilidade de afinação da sala de um modo bastante eficaz, como se comprovou neste trabalho, pela alteração da configuração do teto. Acreditamos que a experiência atual dos músicos com esse

recurso seja ainda insuficiente para extrair do ambiente todas as suas possibilidades. Muitas outras configurações de teto serão certamente testadas e acreditamos que este trabalho possa oferecer importantes subsídios para o sucesso da performance musical na Sala São Paulo, enriquecendo ainda mais a nossa paisagem sonora. [15]

## 6. AGRADECIMENTOS

Queremos deixar expresso nosso profundo agradecimento ao Maestro John Neschling, Diretor Artístico da Sala São Paulo de concertos, e à Sra. Marilda Suyama Tegg, Assessora técnica de Gabinete da Secretaria de Estado da Cultura do Estado de São Paulo, por sua pronta e gentil disponibilização da Sala para os ensaios acústicos dos quais foram extraídos os dados para este trabalho. Também gostaríamos de deixar registrada a colaboração dos técnicos da sala, especialmente o Sr. Cássio Mendes, responsável pela operação do forro móvel.

Desejamos sobretudo agradecer à equipe do Laboratório de Ensaios Acústicos (LAENA), do INMETRO, na pessoa de seu chefe, Dr. Marco Antonio Nabuco de Araújo, que, com sua larga experiência em ensaios acústicos e o suporte de equipamentos do LAENA, viabilizou as medições.

Finalmente, desejamos registrar a inestimável contribuição para o eventual sucesso deste trabalho do Dr. Swen Müller, autor e desenvolvedor do excelente *software* Monkey Forest para processamento de sinais acústicos - com o qual temos trabalhado em diversas teses acadêmicas - um colaborador sempre solícito e prestativo. O Dr. Swen esteve à frente dos ensaios na Sala São Paulo.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1]. Di Marco, A.R. e Zein, R.V., *Sala São Paulo de Concertos*, Alter Market, São Paulo, 2001.
- [2]. Bocchino, A., Depoimento pessoal aos autores, 2004.
- [3]. ISO 3382:1997, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997.
- [4]. Kuttruff, H., *Room Acoustics*, Fourth Edition, E&FN Spon, London, 2000.
- [5]. MÄuller, S. and Massarani, P.M., Transfer-function measurements with sweeps, Publicação interna do LAENA, INMETRO, pp. 1- 49, 1999.
- [6]. Barron, M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, E&F Spon, London, 1993.
- [7]. Beranek, L.L., *Concert and Opera Halls: How They Sound*, Published by Acoustical Society of America, Woodbury, 1996.
- [8]. Hidaka, T. and Nishihara, N., Objective evaluation of chamber-music halls in Europe and Japan, *Journal Acoust. Soc. Am.*, 116 (1), pp. 357- 372, July 2004.
- [9]. Ando, Y., *Architeturial Acoustics*, Springer-Verlag, 1998.
- [10]. Schroeder, M.R., Gottlob, D. and Siebrasse, K.F., Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters, *Journal Acoust. Soc. Am.*, 56, 1195- 1201, 1974.
- [11]. Rushton, J., *A Música Clásica*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1988.
- [12]. Griffiths, P., *Música Moderna*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1989.
- [13]. Harmoncourt, N., *O discurso dos sons*, Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1982.
- [14]. Fagerlande, M., Depoimento pessoal aos autores, 2004.
- [15]. Schafer, R.M., *A afinação do mundo*, Editora UNESP, 1997.

# OS HARMÔNICOS DA ENERGIA ELÉTRICA NO ÁUDIO

**Jorge Knirsch**

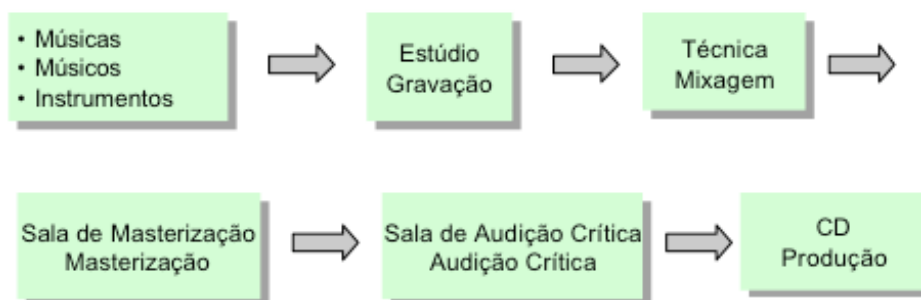
By Knirsch

e-mail: [jorgeknirsch@byknirsch.com.br](mailto:jorgeknirsch@byknirsch.com.br)

Resumo: Este trabalho mostra a influência dos harmônicos na reprodução e gravação de áudio e suas interferências, alterando a percepção musical da mídia. Serão abordados aspectos de filtragem da rede elétrica e também princípios de redução dos harmônicos, através de uma instalação elétrica otimizada para tal fim.

A execução de uma música, feita por uma orquestra, ou por um conjunto de músicos, tocando habilmente seus instrumentos, objetivando executar aquela composição com total fidelidade, ocorre em um certo ambiente que apresenta um comportamento acústico específico para aquele lugar e configuração.

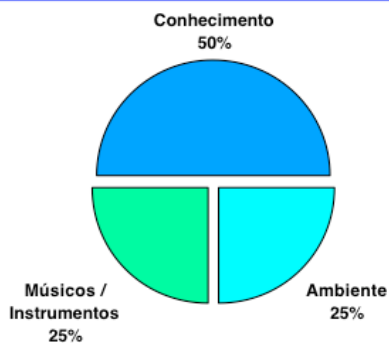
## *Um Acontecimento Musical*



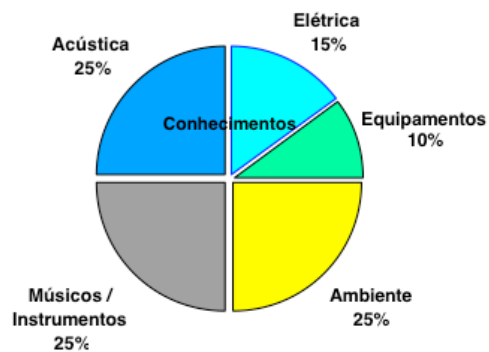
Desejando guardar este momento musical tão especial em uma mídia, em um CD por exemplo, teremos que optar por algum processo de gravação. Se escolhermos um estúdio, este irá procurar recriar o ambiente original para fazer a gravação. Executada esta gravação, a matéria vai para a técnica e começa-se a formação e constituição das faixas do CD. Este é o processo da mixagem. Em seguida, vem a masterização, que realiza um acerto final, principalmente entre as faixas do CD. Após estas etapas, teremos em mãos o nosso primeiro CD, que agora irá ser analisado em uma sala de audição crítica, pouco comum no Brasil, onde o resultado final deverá ser bem avaliado. Estas salas, muito freqüentes no exterior, são chamadas de BLR (Balanced Listening Room) e se enquadram dentro da proposta de norma número IEC 60268-13. Após as avaliações finais, e eventuais correções, o original é enviado à produção para a confecção das cópias do nosso CD. Dentro de todo este universo, há vários fatores de suma relevância para podermos conquistar o sucesso que almejamos: imortalizar aquele momento musical e voltarmos a ele como se estivéssemos “in loco”, sempre que desejarmos.

Os fatores de sucesso para a realização de um projeto desta envergadura, envolvem, além de bons músicos e bons instrumentos (~25%), que são fundamentais, um ambiente apropriado para a gravação (~25%), e também profundos conhecimentos de gravação, microfonação, mixagem e masterização. As porcentagens indicadas são apenas orientativas, para se ter uma idéia das dimensões de cada área envolvida.

## Fatores de Sucesso



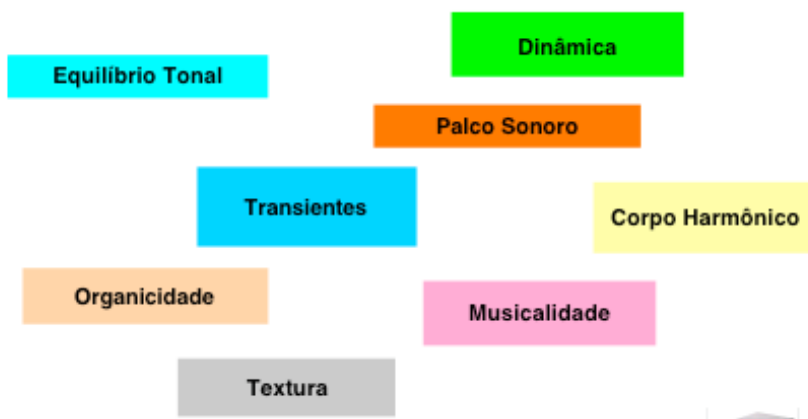
## Fatores de Sucesso



Os conhecimentos de **acústica**, necessários para a otimização de cada um dos ambientes envolvidos, perfazem 50% dos fatores de sucesso, visto que esses ambientes poderão interferir grandemente no resultado final da gravação. Cada um desses locais possui características próprias, bem diferentes entre si, ou seja, **o ambiente ou estúdio** da gravação, com todo conhecimento necessário de microfonação, **a técnica**, para a mixagem, **a sala de masterização** e **a sala de audição crítica** para a avaliação do resultado final.

O próximo fator fundamental, para o nosso sucesso, é a instalação elétrica, embora normalmente lhe seja atribuída pouca relevância. Em terceiro lugar, vêm os equipamentos de gravação e reprodução, aos quais geralmente se atribui uma importância maior do que lhes é de fato devida. Por favor, não se prendam às porcentagens indicadas, pois são valores aproximados, inferidos da prática.

## Percepção Musical



Para se avaliar o resultado final de um CD, em uma sala de audição crítica, com equipamentos de referência, é preciso se ter uma excelente percepção musical. Para isto existem muitas metodologias, todas elas evidentemente subjetivas, sendo a utilizada pela revista americana "**The Absolute Sound**" uma das mais famosas, como também a da revista "**Stereophile**", também americana. Entre as européias estão as usadas pelas revistas "**AUDIO**" e a "**Stereoplay**", ambas alemãs e a da "**Diapason**" francesa. No Brasil temos a metodologia da revista "**Áudio & Vídeo**". Na transparência, apresentamos um mix destas várias metodologias.

A parte mais importante em uma avaliação sonora de uma mídia é, sem dúvida alguma, o **equilíbrio tonal**. Em outras palavras, é a reprodução de todas as faixas de frequências, graves, médios e agudos, com a mesma intensidade sonora e de forma equilibrada. Em seguida, vem o **palco sonoro**, que no CD pode ser criado durante a mixagem, em gravações multicanal ou, se for ao vivo, com o posicionamento dos microfones durante uma gravação em tempo real. O **palco sonoro** se compõe de diversos aspectos como: largura, profundidade, altura, lateralidade, recorte, focagem, planos, etc. que não abordaremos aqui. Em seguida vem o **corpo harmônico**, que representa a

fidelidade e presença dos graves e dos grave-médios na reprodução, item no qual as ondas estacionárias de uma sala, controladas ou não, tem grande influência. Outro item importante é a **dinâmica**. Normalmente, a falta de dinâmica na reprodução costuma ser atribuída aos equipamentos, porém a acústica e a elétrica, com a criação do **palco sonoro**, são fatores predominantes para a sua existência. A **dinâmica** é a capacidade de reprodução dos diferentes níveis sonoros, da mesma maneira como os percebemos durante a execução musical, mas agora em um certo volume por nós ajustado no nosso equipamento. Temos também os **transientes**, que são a capacidade do sistema conseguir reproduzir exatamente o ritmo tocado. Este item depende totalmente dos equipamentos utilizados e sua falta ocorre principalmente em equipamentos e sistemas de entrada. Não confundir com o significado técnico de transientes na eletrônica, que representa a variação de tensão ou de corrente no tempo. A **textura** é a capacidade do sistema reproduzir um conjunto musical ou orquestral com todas as suas nuances musicais. Um dos exemplos mais belos que existem de **textura** é o famoso bolero de Ravel, usado por ele nas suas aulas de composição, exatamente para mostrar as diferentes texturas que se pode criar. A **organicidade ou transparência** é a capacidade que o sistema de reprodução tem de nos dar a impressão de estarmos vivenciando o acontecimento musical como se ele estivesse realmente ocorrendo naquele momento. Aqui, quando nos referimos ao sistema de reprodução, estamos incluindo a mídia, a sala, a elétrica e todos os equipamentos. A orgenicidade depende de todos os outros fatores anteriormente apresentados. Finalmente, temos a **musicalidade** que é a reprodução como se fosse ao vivo, como se todos estivessem tocando naquele instante, razão suprema de ser de qualquer reprodução sonora e de imagem.

### Anomalias da Energia Elétrica

- EMI / RFI (Electromagnetic Interference / Radio Frequency Interference)
- Spikes / Transientes de Chaveamento
- Sub- / Sobretensões →
  - 110V – 115V – 120V – 127V
  - 220V – 230V – 240V – 254V
  - Tolerância nominal média (ANEEL) → +5%  
-9%
- Perda de Neutro
- Variações de tensão →
  - Sags (afundamento de tensão) <90% <3s
  - Swells (elevações de tensão) >110% <3s
  - Flickers
- Surtos de tensão (raios)
- Fator de Potência (defasagem tensão / corrente)
- Harmônicos → de corrente / de tensão → cargas → THD%

A acústica, como vimos, tem uma influência marcante em todo este processo. Mas ao contrário do pensamento corrente hoje entre nós, como segundo fator fundamental de sucesso, logo depois da acústica, não vêm os componentes e equipamentos eletrônicos mas sim a situação da instalação elétrica, com a qualidade de energia que é fornecida aos equipamentos. Isto é importante já de início, a partir da gravação do evento e também depois, durante a mixagem e a masterização e, muito mais ainda, durante a audição crítica para a avaliação do resultado final. A qualidade da energia elétrica é importante em cada estágio do processo de gravação, porque ela poderá tornar a gravação de baixa qualidade. Em conjunto com a acústica, ambas têm sido as principais razões para o baixíssimo nível das gravações nacionais, em relação ao padrão internacional. Se, de um lado, temos excelentes músicos e instrumentistas, de outro, temos enormes oportunidades de melhorar as nossas gravações, para atingirmos um padrão mínimo em relação ao nível internacional.

No quadro acima, estão as principais anomalias da energia elétrica. São oito itens listados. Enquanto que os seis primeiros são de ocorrências normalmente destrutivas, os dois últimos são impurezas, sujeiras que contaminam a energia elétrica. Para os seis primeiros itens, necessitamos de proteções efetivas e para os dois últimos são necessárias competentes filtragens.

As EMI/RFI (Eletromagnetic Interference / Radiofrequency Interference) são ondas eletromagnéticas existentes no ar, advindas da propagação de ondas de estações de rádio, televisões e celulares. Estas ondas podem entrar nos nossos equipamentos, ou melhor nos nossos sistemas, ser demoduladas e ouvidas juntamente com o evento musical que estamos apreciando. Por exemplo, a interferência de uma estação de rádio, sendo reproduzida simultaneamente com a música que estamos ouvindo. Estas interferências são as mais fáceis de serem eliminadas.

Quanto aos “*spikes*”, que são transientes de chaveamento, ou seja elevações de tensão de pequena duração, que ocorrem durante por exemplo, a comutação de bancos de capacitores para a correção do fator de potência ou, então, no simples ligar/desligar de um interruptor, são interferências que uma boa filtragem da energia elétrica consegue retirar.

Quanto às diferentes tensões existentes no Brasil, existem alguns problemas dignos de nota. Levando-se em conta a tolerância média especificada pela ANEEL de +5% e -9%, na tensão nominal de 127V, que deverá se tornar padrão entre nós, teremos que, com a tolerância máxima, esta tensão passará dos 130V. E, não raramente, em algumas regiões chega a 135V, tensão esta que muitos dos nossos equipamentos importados não suportam, trabalhando permanentemente sobre-aquecidos, o que leva a uma redução de suas vidas úteis, quando não os leva precocemente à queima. Neste caso, é necessário o uso de autotransformadores abaixadores, para reduzir a tensão nominal e, com isto, garantir a vida útil normal dos equipamentos de áudio/vídeo.

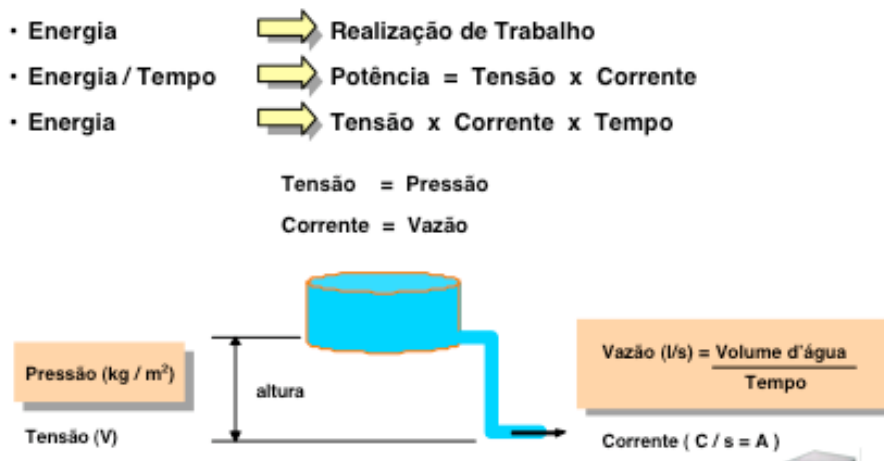
Uma próxima anomalia que costuma ocorrer entre nós, geralmente por desconhecimento, é a interrupção do neutro. Em instalações elétricas com duas fases, o neutro jamais deverá ser interrompido, seja por um fusível ou por um interruptor qualquer. Esta interrupção, quando involuntária, também poderá levar à queima de aparelhos. No nosso site: [www.byknirsch.com.br](http://www.byknirsch.com.br) encontra-se um artigo sobre o assunto com todos os detalhes.

As variações de tensão, onde ocorrem afundamentos e elevações da tensão com duração de até 3s, também são muito comuns entre nós e, da mesma forma, podem danificar os aparelhos.

O fator de potência será visto em uma figura específica mais adiante.

Chegamos agora à principal anomalia da energia elétrica, a nosso ver, que são os harmônicos, e que podem chegar a causar grande deterioração na qualidade da gravação e também na da reprodução. Os harmônicos são a razão desta palestra. Mostraremos a seguir o resultado de nossas pesquisas técnicas nesta área. Analisaremos como os harmônicos surgem e que efeitos provocam no resultado final de uma gravação em mídia. Não poderemos deixar de mostrar também os caminhos para a atenuação destes harmônicos, através de filtros competentes da rede elétrica.

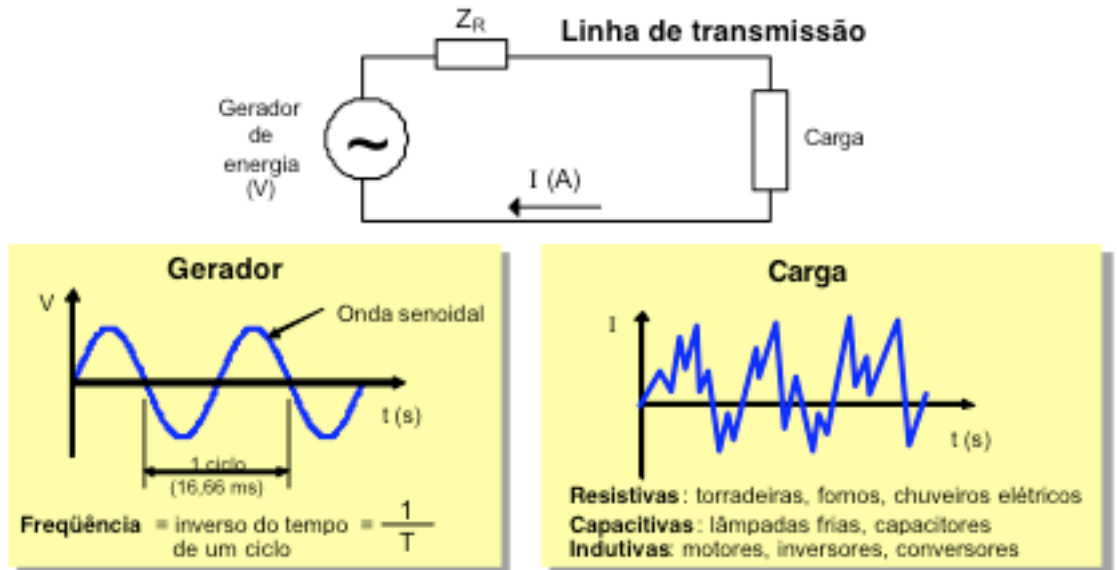
### Rede elétrica



Acima, apenas para lembrar, os conceitos de energia, potência, tensão e corrente, fazendo uma analogia com um sistema hidráulico, que é de compreensão mais fácil.

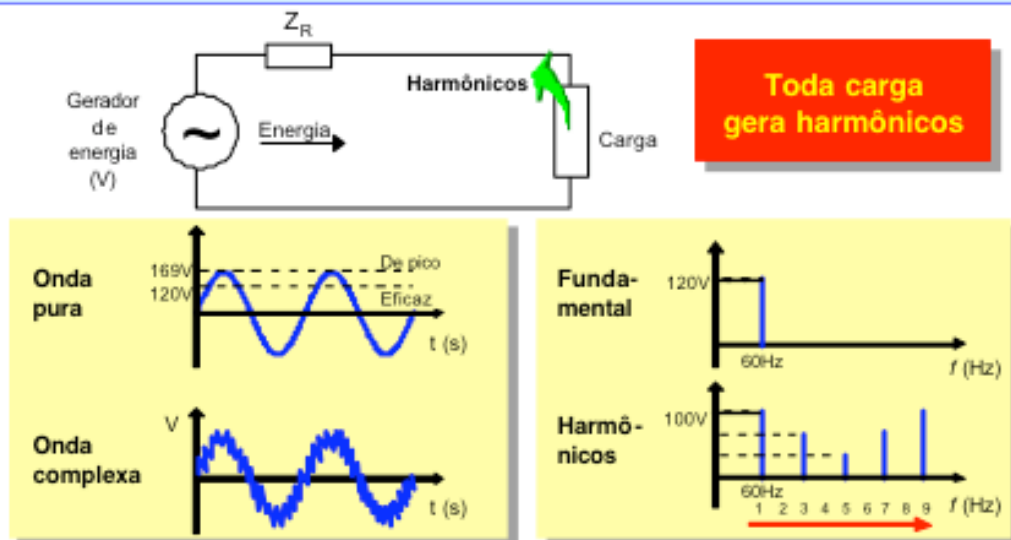


## Energia elétrica



A energia elétrica gerada em usina hidro- ou termo-elétrica é a mais pura que podemos obter.

## Energia elétrica - Harmônicos

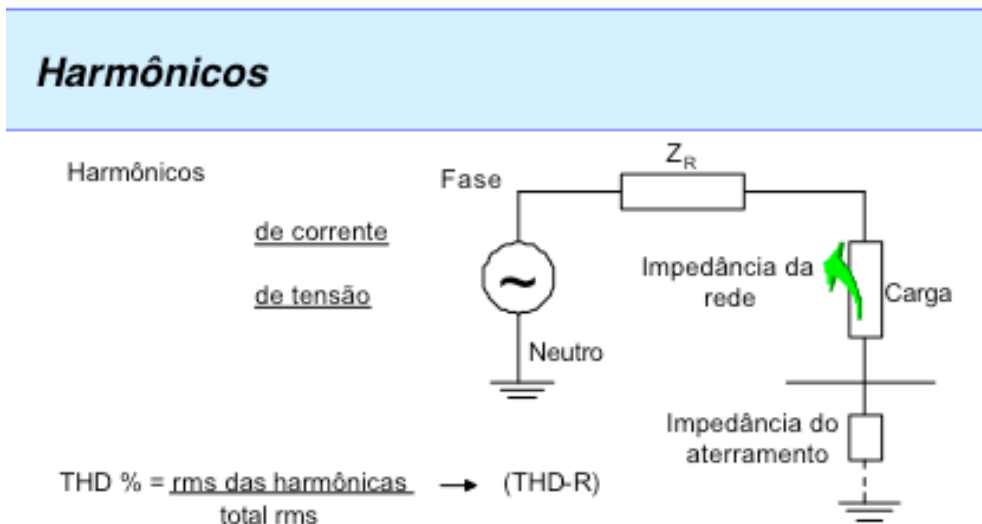


As cargas elétricas, que na verdade, nada mais são do que os inúmeros tipos de aparelhos elétricos que ligamos à rede elétrica, são os que geram os harmônicos. Estes harmônicos são ondas senoidais em corrente ou tensão, gerados pelas cargas e devolvidos à rede elétrica, criando ondas complexas de corrente e/ou tensão.

Existem dois grandes grupos de cargas: as lineares e as não-lineares. Entre as lineares estão as resistivas, as capacitivas e as indutivas e, evidentemente, as mais variadas composições entre estas três. As maiores e principais cargas deste grupo são, sem dúvida alguma, os motores.

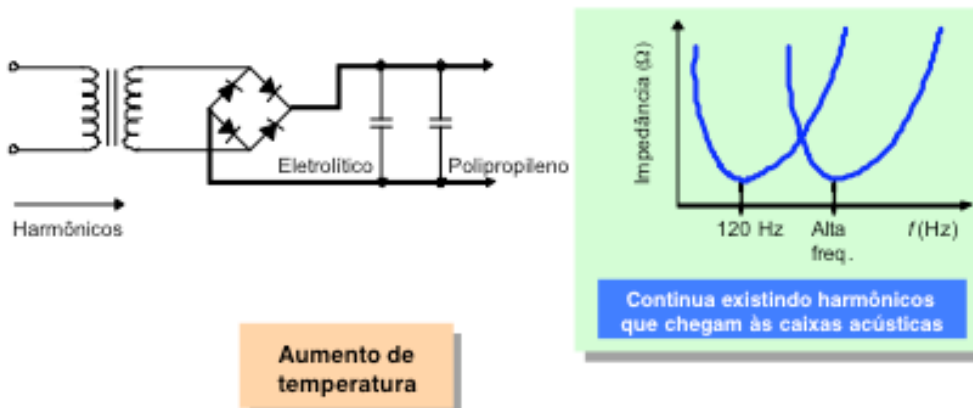
Entre as cargas não-lineares estão os conversores, inversores, computadores e *no-breaks*, que só surgiram mais recentemente, com a criação dos componentes eletrônicos mais modernos, como os tiristores e os triacs. Estas cargas geram um conteúdo de harmônicos muito elevado e são os

grandes poluidores elétricos da nossa energia. Normalmente utilizam fontes chaveadas. Infelizmente, no Brasil, não existe nenhuma norma, na baixa tensão, como ocorre nos países do primeiro mundo, que controle este volume de harmônicos introduzidos na rede elétrica, gerados principalmente pelas indústrias. Temos apenas recomendações para o conteúdo harmônico na média tensão. Esta nossa política está propiciando, paulatinamente, um aumento do conteúdo harmônico da rede elétrica, prejudicando a qualidade de energia que recebemos e usamos. E a utilização desta energia de baixa qualidade traz como consequência o aumento da temperatura de funcionamento dos nossos aparelhos elétricos ligados a ela, o que pode causar uma redução da vida útil destes equipamentos. Em equipamentos de alta precisão, como em diversos aparelhos médicos, tem trazido alterações dos resultados medidos.

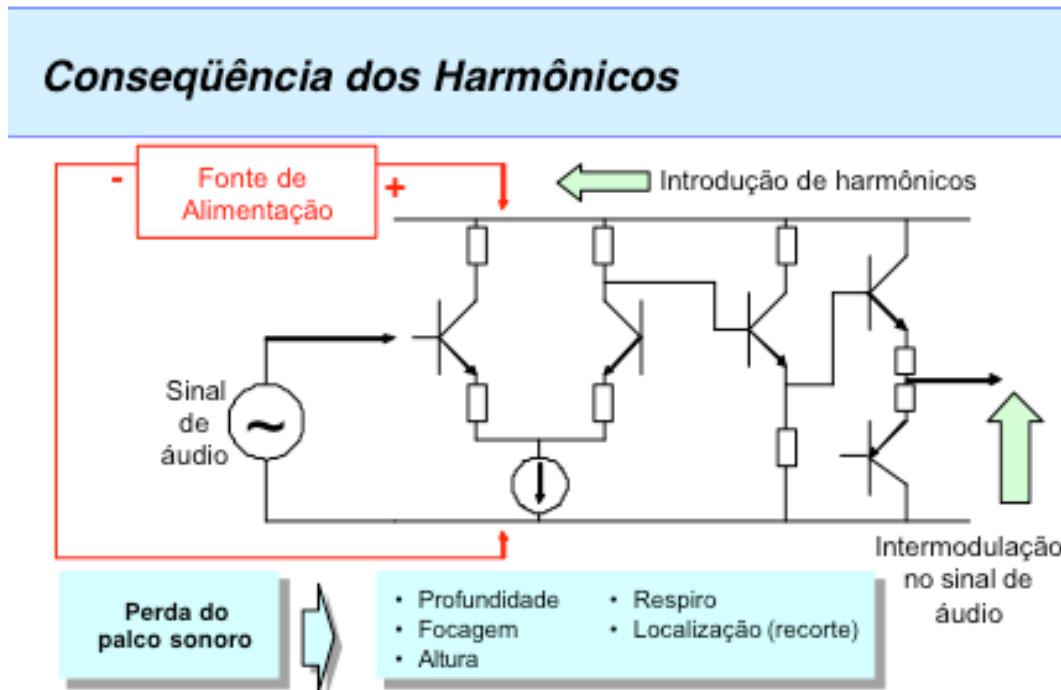


Os harmônicos podem ser de corrente e de tensão. Estas distorções poderão ser medidas por um parâmetro chamado THD (Total Harmonic Distortion), ou seja, Distorção Harmônica Total. O THD é o quociente, expresso em porcentagem, da raiz quadrada da soma dos quadrados das tensões eficazes de cada harmônico, dividida pelo valor eficaz da fundamental. Poderemos obter estas tensões eficazes através de um analisador de redes elétricas como, por exemplo, o **Fluke Power Meter**, que mede a tensão, a corrente e a fase, por harmônicos, e nos indica o THD diretamente em porcentagem.

## Consequência dos Harmônicos



Nos nossos aparelhos de áudio e vídeo, a energia da rede elétrica é transformada, através de uma fonte de alimentação, em energia contínua, necessária para a alimentação das placas eletrônicas dos circuitos dos aparelhos. A fonte de alimentação se constitui normalmente de um transformador, de uma ponte retificadora e de um circuito de filtragem, e ainda poderá haver um circuito de regulação de tensão. Assim como a fundamental da energia elétrica é retificada pela ponte retificadora, constituída de dois ou quatro diodos, assim também todos os harmônicos o serão da mesma maneira. Acontece que no circuito de filtragem, constituído normalmente por capacitores, a filtragem não é completa e resquícios dos harmônicos permanecem no *ripple* da tensão contínua que irá alimentar todos os circuitos eletrônicos. Mesmo com circuitos de regulação, ainda é possível constatar harmônicos na tensão contínua de saída.



Esta tensão contínua, com o seu *ripple*, incluso aí os resquícios dos harmônicos da energia elétrica, vai alimentar os circuitos de amplificação dos sinais de áudio e vídeo e estes harmônicos irão se sobrepor ao sinal de áudio/vídeo por intermodulação. Portanto, adicionado ao sinal de vídeo e de áudio amplificados, existirão sinais espúrios, vindos das fontes de alimentação e que vão criar as colorações no som e na imagem. Neste instante ocorrerão alterações do sinal original, causadas pela qualidade da tensão contínua dos aparelhos. Estas colorações irão alterar o palco sonoro, tanto da imagem quanto do som, levando à falta de profundidade e de focagem. Na parte da reprodução sonora, as colorações acabarão fazendo com que o acontecimento musical se desenrole nas caixas acústicas, não permitindo a criação do palco sonoro. Quanto à imagem, esta se tornará bidimensional.

### Coloração do som

- Harmônicos reproduzidos que não fazem parte do original ( discos CD, LP, imagem )
- Podem surgir da rede elétrica, da acústica ou dos equipamentos

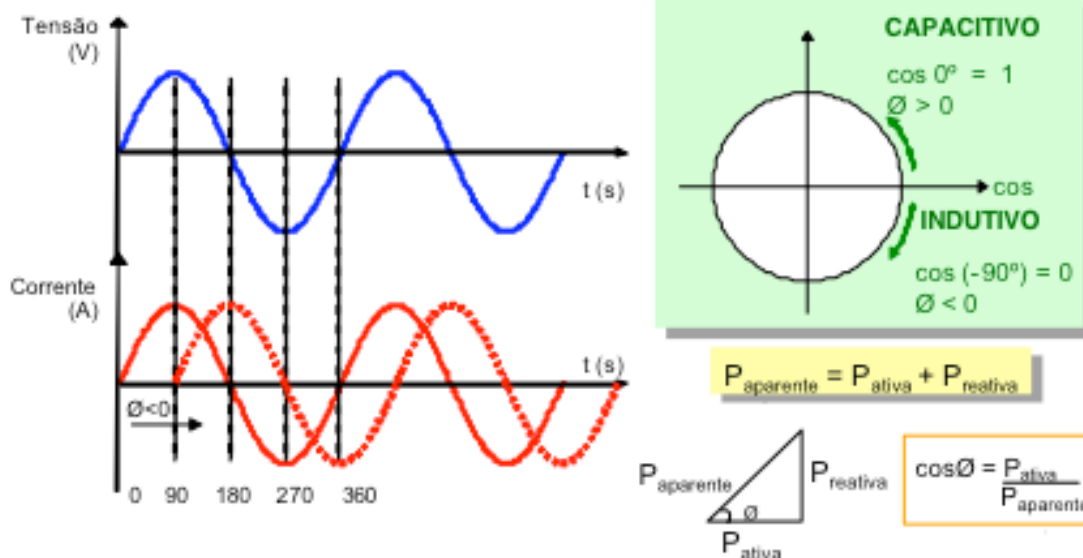
As colorações da rede elétrica são alterações por intermodulação, no sinal de áudio e vídeo, causadas pelos resquícios dos harmônicos da energia elétrica que alimenta os aparelhos eletrônicos. Estudos profundos sobre este assunto foram feitos pelos fabricantes **Mark Levinson** e **Jeff Roland**. A **Mark Levinson** procurou estudar todos os tipos de fontes de alimentação e chegou à conclusão que, mesmo com a melhor regulação possível, ainda não conseguiria retirar todos os vestígios da rede elétrica original. Então o que ela fez? Retificou a tensão da rede elétrica, transformando-a em tensão contínua e depois voltou a oscilar uma nova tensão alternada, para novamente retificar e obter uma nova tensão contínua limpa. Em outras palavras, ela foi, voltou, e criou um novo DC pela segunda vez. Ao fazer isso, a redução de harmônicos foi drástica. Esta solução resolveu o problema dos harmônicos, mas criou dois novos desafios. O primeiro, por se tratar de circuitos em série com a rede, ficou muito difícil manter a neutralidade do som no sistema e, em segundo lugar, esta solução resultou extremamente onerosa, pois utiliza muitos componentes que precisam ser de altíssima qualidade. A **Mark Levinson** usa este sistema nos seus *powers* 33 e 33H.

A **Jeff Roland** já se enveredou por dois outros caminhos. Um deles foi o uso de baterias. Embora a bateria apresente um nível de tensão contínua muito limpo (mas tem ruídos também!), esta nova solução envolve outros desafios a serem vencidos. Logo de início, é necessário se garantir uma reserva a mais de capacidade em AH (Ampère-Hora), para que a qualidade do DC seja realmente boa. Isto faz com que o volume e o peso das baterias fiquem muito grandes. Outro problema é o sistema de recarga das baterias, que precisa ser muito sofisticado, para aumentar a vida útil destes equipamentos.

A outra solução pesquisada e implementada pela **Jeff Roland** foi o uso de fontes de alimentação chaveadas. Nós mesmos já publicamos um artigo a respeito de fontes chaveadas, com muitos detalhes técnicos. Estas fontes, muito leves e de baixo custo, trabalham com frequências mais altas, o que torna a filtragem um pouco mais simples, porém o problema não fica totalmente resolvido com relação ao som e à imagem, de forma que não vêm a ser uma solução audiófila.

### Fator de Potência

#### Defasagem entre Tensão e Corrente



O fator de potência, que é o valor co-seno da defasagem entre a tensão e a corrente consumida pelo nosso sistema de áudio/vídeo, tem grande influência no equilíbrio tonal e na dinâmica do resultado sonoro final. Poucos equipamentos, entre os amplificadores de áudio/vídeo de alto nível, possuem correções internas do fator de potência.

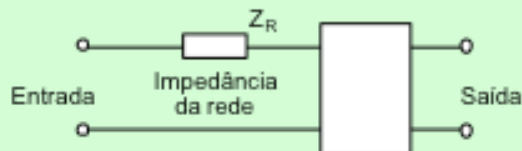
## Filtragem da Rede Elétrica

<b>Limpeza da rede elétrica</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Redução dos harmônicos da rede</li><li>- Correção do fator de potência do sistema</li></ul>
<b>Proteção</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Eliminação de transientes, transitórios e spikes</li><li>- Proteção contra raios e anomalias da energia elétrica</li><li>- Proteção contra sobretensões e subtensões</li><li>- Falta de energia</li></ul>

Uma filtragem da rede elétrica deverá oferecer dois importantes aspectos. Em primeiro lugar, a redução dos harmônicos da rede elétrica, ou seja, a redução do THD, acompanhado de uma possibilidade de correção do fator de potência. E, em segundo lugar, uma eficiente proteção contra as anomalias aperiódicas da energia elétrica.

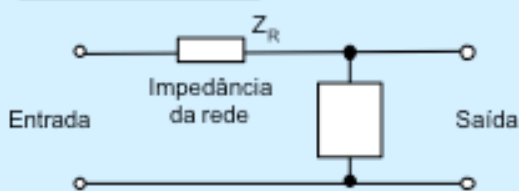
## Componentes eletrônicos de filtragem

### Filtros em Série



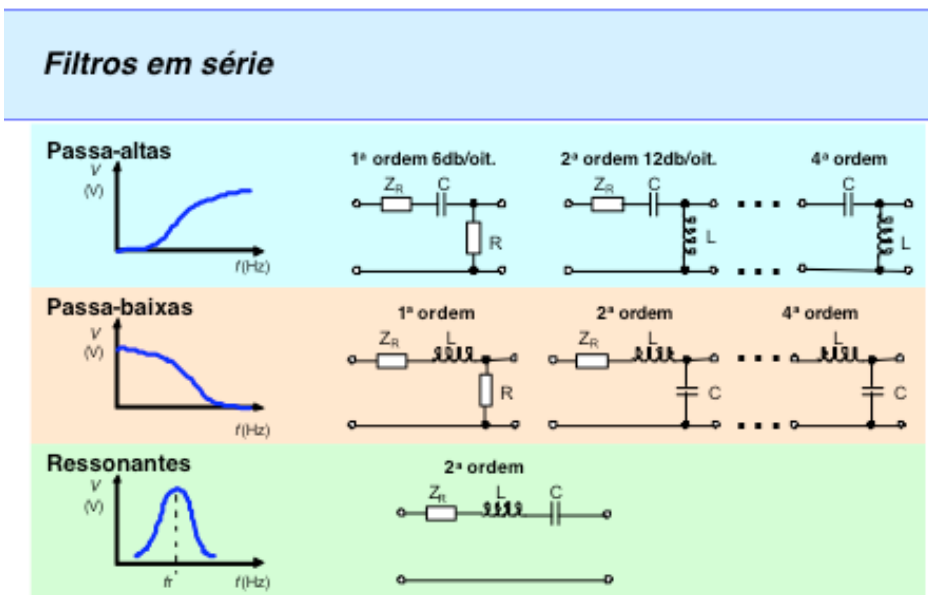
- Todos geram coloração
- São de baixo custo

### Filtros em Paralelo

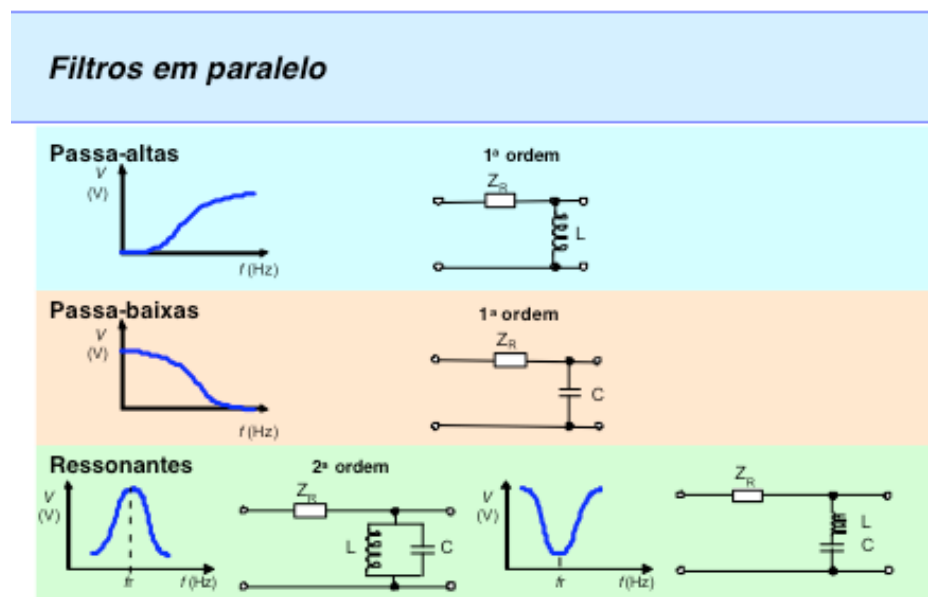


- Podem não gerar coloração
- São mais neutros e de alto custo

Existem dois grandes grupos de filtros que poderão ser aplicados à rede elétrica: os filtros com componentes em série com a rede elétrica e os filtros com componentes em paralelo com a rede elétrica.

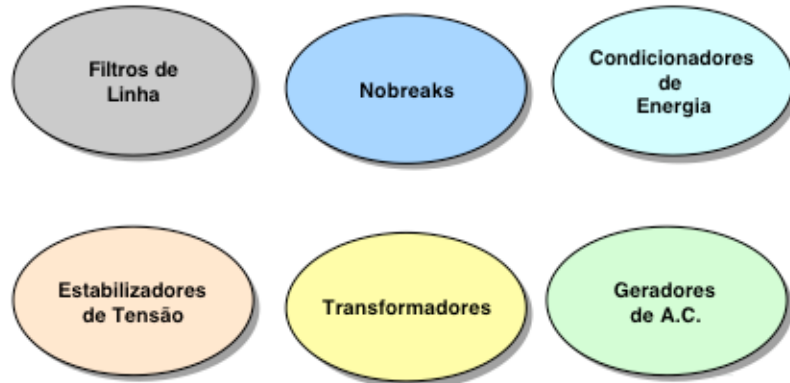


Acima temos alguns exemplos de filtros com componentes em série com a rede elétrica. Entre todos eles, os mais usados pelos fabricantes são os filtros passa-baixas, principalmente os de segunda ordem. Em extensas e profundas análises que realizamos quanto à aplicação destes filtros com componentes em série, para a filtragem da rede elétrica, na alimentação de equipamentos de áudio e vídeo, observamos que, ao mesmo tempo em que ocorre uma filtragem de uma certa faixa de harmônicos, normalmente em altas frequências, novas colorações são criadas e injetadas na rede elétrica em outras regiões do espectro audível, prejudicando a reprodução do som e da imagem. Como toda carga gera harmônicos e como os componentes em série têm a característica de aumentar a impedância da linha, vimos que a influência destes harmônicos, somada ao aumento da impedância da linha, traz grandes alterações ao sinal original da imagem e do som, acarretando uma deterioração marcante no sinal original de áudio e vídeo. Todas as nossas análises e pesquisas mostraram que, mesmo confeccionando os componentes em série com a mais alta tecnologia possível e com a mais baixa impedância praticável, não se consegue evitar a introdução de uma coloração indesejável. **Portanto concluímos que, em sistemas de altíssima qualidade de gravação e reprodução de imagem e som, não é recomendável o uso de componentes em série com a rede elétrica, com o risco de se introduzir colorações indesejáveis no sinal eletrônico da mídia de forma permanente.**



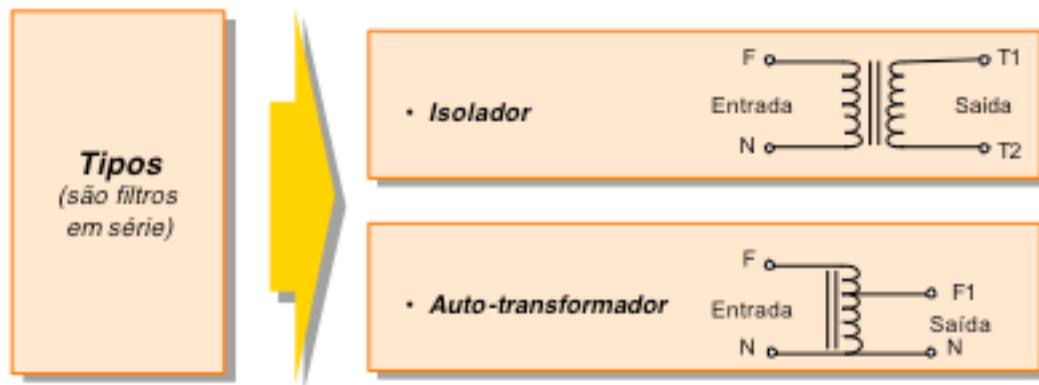
Entre os filtros com componentes em paralelo com a rede elétrica, os passa-baixas são muito usados, assim como alguns filtros ressonantes que se prestam bem a esta finalidade.

## Aparelhos de filtragem



Vamos aqui comentar os principais aparelhos de filtragem que existem no mercado. São eles: os filtros de linha, *nobreaks*, transformadores, estabilizadores de tensão, geradores de AC, e condicionadores de energia. Existem alguns aparelhos que usam adaptações de baluns de ferrite, que vamos comentar junto com os transformadores.

## Transformadores



- Retiram harmônicos acima de 8 kHz
- Introduzem muita coloração em baixas frequências de 100 a 500 Hz
- Os auto-transformadores têm menos coloração

Os transformadores são componentes elétricos, colocados em série com a rede elétrica que, além de transformar os níveis de tensão, também têm propriedades de filtragem. Conseguem retirar harmônicos da rede somente a partir de 8kHz. Quando os conectamos aos sistemas de áudio e vídeo, surgem mudanças sonoras que, de início, podem parecer até muito agradáveis, pois a primeira impressão que nos dão é que o som fica mais limpo na parte das altas frequências e, na parte dos médios baixos, surge um volume sonoro maior, o que em consequência aumenta o corpo harmônico. Este resultado pode variar de sistema para sistema. Mas, à medida que realizamos audições mais críticas, vamos percebendo que os discos são reproduzidos com uma característica tonal muito semelhante entre si e isso, com o passar do tempo, pode causar fadiga auditiva. Este fenômeno se explica pelo fato dos transformadores serem circuitos elétricos em série e, portanto, introduzem novos harmônicos. Neste caso, em baixas frequências, em torno de 100 a 500Hz, surgem colorações na

rede elétrica. Entre os dois tipos básicos de transformadores existentes, os isoladores e os autotransformadores, são os autotransformadores que trazem menor coloração. O volume de coloração introduzida dependerá muito do cuidado na construção eletromecânica destes componentes e do projeto elétrico. Em princípio, estes aparelhos devem ser evitados sempre que possível. Muitos estúdios, inclusive em nível internacional, usam transformadores isoladores de alta potência na relação 1:1, na entrada da energia elétrica, muitas vezes com o objetivo de tornar a rede elétrica balanceada. Este procedimento apresenta muitos pontos negativos, pois normalmente aumenta o THD da linha elétrica e pode se tornar audível na mídia gravada. A rede elétrica balanceada traz muito pouco benefício pois, com a necessidade da introdução de um transformador isolador, acaba introduzindo também colorações em baixa frequência e aí as vantagens praticamente se anulam. A colocação em série com a rede elétrica traz mais prejuízos do que vantagens à mídia gravada e, portanto, deve ser evitada a todo custo.

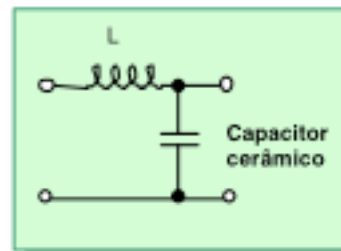
Outra prática que está ocorrendo agora no mercado é a adaptação do uso de baluns com núcleos de ferrite para a energia elétrica. Neste caso, a situação se agrava ainda mais, porque além do uso do princípio do balun, que nada mais é do que bobinas em série/paralelo adaptadas à rede elétrica, o uso do ferrite introduz novas colorações nos agudos, tornando a gravação/reprodução da mídia metálica. O resultado é falta de neutralidade no sinal de áudio e vídeo da mídia.

### Filtros de linha

#### Tipos

- Formato de uma régua
- Com tomadas de uso específico

- Não eliminam harmônicos (são muito leves)
- Eliminam transientes, spikes (100 kHz a 300 kHz)
- Usam filtros série passa-baixas de 2ª ordem
- Coloração de 3 kHz a 12 kHz: Metalizam os agudos
- Usam transformadores isoladores em algumas tomadas



Sem dúvida nenhuma, entre os diversos aparelhos de filtragem existentes no mercado, os mais largamente usados e divulgados são os já famosos **filtros de linha**. Estes, via de regra, são usados como extensão de tomadas e possuem internamente um filtro série passa-baixas de 2.ª ordem. Usam uma pequena bobina de ferrite e um capacitor que chega, em alguns casos, a ser de cerâmica. Estes componentes em série produzem uma coloração típica que é a metalização dos agudos, muito comum em grande parte dos CDs gravados no Brasil. Em alguns poucos casos, são usados também transformadores isoladores, criando a também típica coloração nos médios baixos. Esta é a filtragem mais empregada entre nós e a mais perniciosa para a rede elétrica em todos os aspectos.



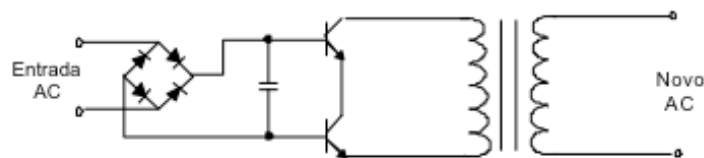
### Estabilizadores de tensão - Nobreaks

- Construídos com transformadores isoladores com tapes (em série)
- Possuem a mais alta coloração entre os aparelhos de filtragem
- Não recomendados para áudio e vídeo

Todos os **estabilizadores de tensão** utilizam-se de transformadores isoladores e, portanto, sofrem dos mesmos problemas destes componentes. Na verdade, como muitos modelos se utilizam de tapes (derivações no secundário), o volume de harmônicos é maior ainda. Existem outros que trabalham com o assim chamado núcleo saturado, que permite alguma limitação para tensões maiores, mas estes são ainda mais ricos na geração de harmônicos. Os **estabilizadores de tensão** são, sem dúvida, dos aparelhos de filtragem que mais harmônicos injetam na rede e não deveriam ser utilizados em nenhum sistema de áudio/vídeo. Como não existe uma solução eletrônica neutra para se estabilizar a tensão, a não ser através de componentes em série com a própria rede, conseqüentemente todas as possibilidades são problemáticas, por gerarem harmônicos. E também pelo fato de haver um aumento da impedância da linha, temos mais ainda que procurar uma alternativa. Uma possibilidade seria a de se fazer um circuito eletrônico em paralelo, capaz de controlar os valores máximos e mínimos da tensão, de modo a poder desligar o sistema caso necessário. Por isso recomendamos, como função relevante dos aparelhos de filtragem, não a estabilização da tensão, mas sim a proteção do sistema contra sobretensões e subtensões, ou seja, através de um controle dos limites máximos e mínimos permitidos.

Acrescento aqui também os tão comentados **nobreaks**. São muito falados no mercado e muitos estão usando estes aparelhos, sem ter realmente idéia de como eles funcionam. Além de utilizarem transformadores isoladores, como os estabilizadores de tensão, geram um novo AC, a partir de baterias, normalmente através de um comando digital em PWM. Porém a onda gerada, na maioria destes aparelhos, é uma onda quadrada e não uma onda senoidal, como deveria ser, com filtros agregados para reduzir um pouco os harmônicos. Mesmo nos aparelhos que se dizem gerar uma onda senoidal, esta não é pura e tem um conteúdo harmônico muito alto, chegando até a ser proibitivo seu uso. De todos os aparelhos comentados, estes apresentam o maior conteúdo harmônico.

### Geradores de AC



#### Desvantagens:

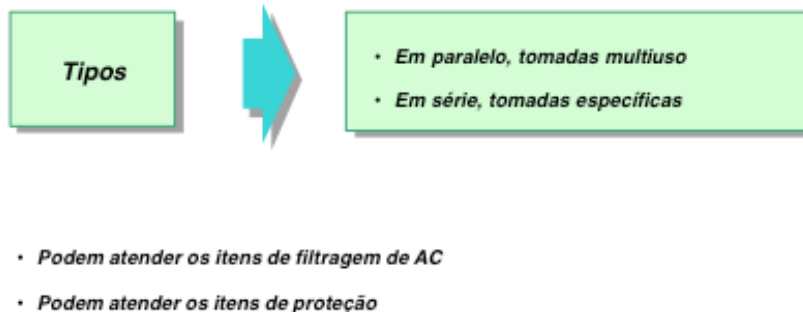
- É um filtro série - Pode ter coloração
- Baixa potência
- Alto custo

#### Vantagem:

- Reduz harmônicos

O **gerador de AC** transforma a energia alternada da rede em energia contínua, para então gerar uma nova energia alternada. Este processo reduz bastante os harmônicos da rede, quando o AC é gerado de forma analógica, porém como são aparelhos com componentes em série, geram novos harmônicos. Existem processos e tecnologias que conseguem significativas reduções nos níveis de harmônicos. Dentre todos os aparelhos de filtragem, são os de custo mais elevado, quando os analisamos do ponto de vista do custo por KW de potência disponível que eles podem oferecer ao nosso sistema.

### Condicionadores de energia



E aqui entramos na análise dos **condicionadores de energia**. Alguns destes aparelhos podem atender às seis funções que apresentamos para os aparelhos de filtragem. São equipamentos que, de modo geral, nos oferecem a filtragem do AC e a proteção dos nossos equipamentos. Existem dois grandes grupos de condicionadores de energia: um com tomadas específicas e com componentes em série e outro grupo, bem menor, com tomadas multiuso e componentes em paralelo. Os condicionadores de energia com componentes em série, pelas razões acima apresentadas, geram um volume de harmônicos muito alto. Os que utilizam circuitos em paralelo, apresentam várias topologias, como vimos anteriormente, e podem ser muito potentes, permitindo uma drástica redução dos harmônicos, principalmente daqueles de baixas frequências, que são os mais difíceis de serem retirados e que trazem maior coloração para o nosso som. Estes condicionadores de energia podem reduzir os harmônicos, com um resultado sonoro muito neutro. Como são filtros específicos para uma dada tensão da rede, não permitem bivoltagem. O que acontece também é que, para atender às quatro últimas funções de proteção indicadas, de maneira correta, o condicionador deve ser destinado apenas a uma tensão da rede. Portanto, devem ser evitados os aparelhos que são de bivoltagem, pois não poderão atender a todas as funções necessárias.

Alguns condicionadores de energia apresentam uma característica que é muito interessante aqui no Brasil. Como vocês sabem, de vez em quando a energia elétrica cai e, quando retorna, pode voltar no primeiro instante com uma tensão mais alta, eventualmente queimando algum aparelho. Estes condicionadores possuem um dispositivo interno que, na queda da tensão da rede, se desligam automaticamente e não religam quando a energia retorna, de forma a proteger todo o nosso sistema. Eles religam apenas manualmente. Esta é uma característica muito importante que já salvou muitos sistemas por aí.

## ORIENTAÇÕES PRÁTICAS

- Fazendo um fechamento: **menos é mais**, ou seja, em caso de dúvida e falta de conhecimento do que fazer com a energia elétrica, é melhor não fazer nada, não acrescentar nada à rede elétrica, pois o risco de se aumentar o conteúdo harmônico da energia elétrica é muito maior sem um conhecimento detalhado da situação. Em seguida, colocamos um guia prático, em ordem simples e econômica, para ser seguido na otimização de instalações elétricas.

- A utilização de uma fiação dedicada saindo da entrada do estabelecimento para os equipamentos de áudio e vídeo é recomendável, pelo fato de reduzir um pouco a contaminação de harmônicos no sistema de áudio/vídeo a ser alimentado.
- Como disjuntores e fusíveis são componentes de proteção utilizados em série com a rede elétrica, os que tiverem menor impedância, ou seja os fusíveis, deverão ser empregados nas aplicações de alimentação elétrica para áudio e vídeo. Portanto, em todos os circuitos destinados ao áudio e vídeo deveremos dar preferência ao emprego de fusíveis. Isto é muito pertinente, principalmente em estúdios. A razão para isto é que os elementos interruptores nos fusíveis, normalmente chamados de elos-fusíveis, possuem impedâncias menores do que a soma da bobina de curto-circuito e das resistências dos bimetálicos dos disjuntores.
- A fiação dedicada para a alimentação dos equipamentos deverá empregar fios sólidos para a fiação das fases e do neutro e fiação flexível para o aterramento. Os fios sólidos, em comparação com os cabos flexíveis de mesma bitola, apresentam um aumento maior da impedância em altas frequências, devido ao efeito *Skin*, também chamado de efeito pelicular. Esta característica dos fios sólidos corrobora na redução do fluxo dos harmônicos pela rede elétrica.
- Os contatos elétricos realizados por pressão dos elementos apresentam resistências mais baixas do que os contatos soldados. Portanto, nas emendas da fiação elétrica da rede, é recomendável se evitar soldas com estanho/chumbo.
- É importante melhorar o aterramento do neutro da nossa rede elétrica, pela razão de ser preponderantemente uma rede elétrica aérea e, por isto, com aterramento do neutro insuficiente!. A confecção de uma malha de aterramento na superfície do estabelecimento é muito recomendada, para abaixar a impedância do neutro, o que colabora com a estabilidade da tensão elétrica e reduz o ruído drasticamente.
- aterramento do terra deverá ser feito conforme a norma NBR5410 em TT, por dentro do aterramento do neutro, para aumentar a segurança e reduzir o ruído. No quadro geral de entrada, principalmente de estúdios, onde estão o neutro e o terra, poderemos montar um sistema que permita transformar o aterramento TT em TN, quando o estúdio não estiver sendo usado.
- Recomendamos que seja evitado o uso de transformadores, filtros de linha, estabilizadores de tensão, *nobreaks*, pelo fato de serem os maiores introdutores de harmônicos na rede elétrica.
- Quando necessário, o melhor é usarmos somente extensões neutras e minimalistas.
- Para a filtragem, finalmente, o ideal é utilizarmos condicionadores de energia com todos os componentes em paralelo.

# ACÚSTICA EM HOMESTUDIOS

Omid Bürgin  
OMIDstudios  
omid@omid.com.br

Resumo: Atualmente, a maior parte das gravações são realizadas em *Homestudios*, entretanto, elas não aproveitam as possibilidades que os ambientes acústicos caseiros podem oferecer. Com base nas teorias de acústica e nas concepções de produção, pretende-se mostrar as principais estratégias de captação de áudio em *Homestudio* que possibilitem uma captação e gravação sonora de alta fidelidade, com o intuito de obter matéria-prima sonora de alta qualidade para produções musicais, cinematográficas, etnomusicológicas e para documentários.

## 1. INTRODUÇÃO

Adinaldo Neves, em seu artigo *Music Recording in Brazil Hot Sounds, Big Business* da revista *Mix* de profissionais de áudio nos Estados Unidos, salienta o crescente mercado da produção fonográfica no Brasil:

“O Brasil sempre teve fama por sua música, especialmente sua ‘world music’ (pagode, axé, samba e outros, incluindo a música de Caetano Veloso, considerada ‘world music’ no sistema de classificação internacional) e jazz (incluindo bossa nova). O que muitas pessoas não sabem é que o Brasil tem o terceiro maior mercado do mundo. Isso é impressionante, especialmente porque o mercado é extremamente auto-suficiente: Artistas Brasileiros raramente saem fora do país para gravar ou mixar e a maior parte da música é vendido no próprio país. Os amantes de música sustentam a própria vitalidade de sua comunidade musical.” (Neves, 1998:70 – tradução do autor)

“O nosso mercado, nos últimos quatro anos, tem dobrado em tamanho”, segundo Sergio de Carvalho, Diretor Artístico da *Universal Music*. “Hoje em dia cerca de 100 milhões de CDs são vendidos por ano [1998] e neste momento, a produção doméstica representa 75% do mercado”. (citado em Neves, 1998:70 – tradução do autor)

Este artigo apresenta a acústica musical aplicada por pessoas que normalmente estão trabalhando dentro da indústria de produção fonográfica comercial, mas não estão envolvidos na produção acadêmica do país. Acreditamos que este artigo possa enriquecer este seminário por introduzir um público que representa uma nova dimensão da produção fonográfica do país. É de grande importância que, no Brasil, o mercado musical ativo de comunidades de estúdios de gravação tenha um convívio mais próximo com a comunidade acadêmica.

Quando começou a revolução dos *home-studios*, trinta anos atrás, este tipo de gravação não foi considerado profissional por três razões:

- (1) os *home-studios* não podiam oferecer a mesma qualidade de equipamento que os estúdios profissionais ofereciam;
- (2) os donos de *home-studios* jamais iriam ter os conhecimentos técnicos dos técnicos profissionais;
- (3) a acústica de um dormitório ou de uma garagem não pode ser comparada a uma sala de captação profissional, acusticamente projetada.

Desde então, dois de três destes argumentos perderam força: a qualidade de equipamentos num *home-studio* melhorou muito nos últimas décadas e os técnicos melhoraram muito as técnicas da gravação através de livros, revistas e internet, às vezes até superando técnicos de estúdios profissionais. O terceiro argumento foi o mais difícil de superar pois obter acústicas profissionais era um assunto caro. Sem ter dezenas de milhares de dólares à disposição, ficamos sem esta acústica ao nosso alcance e a locação de uma sala de captação envolve grandes investimentos: em São Paulo custaria na média R\$100/hora, nos EUA R\$400/hora. Isso é relevante se pensarmos que um projeto comercial de produção fonográfica usaria em média 120 horas de estúdio para produzir um disco comercialmente lançado.

Neste caso ficaríamos presos aos ambiente que temos. Mas isso significaria que os nossos projetos seriam de segunda classe? Este artigo pretende mostrar o contrário. Nossas casas têm uma diversidade de espaços acústicos, em muitos casos, que possuem maior variedade de espaços sônicos do que muitos estúdios de gravação. Aproveitar os espaços caseiros pode ser complicado, mas com um pouco de orientação e prática pode-se capturar gravações de ótima qualidade sonora

no conforto de casas comuns. Temos inúmeros exemplos, incluindo projetos comerciais como *Ringo Starr (Vertical Man)*, *Ozzy Osbourne*, etc.

Neste artigo concentramos-nos em quatro tipos de ambientes sonoros para captação, que são encontrados em quase todas as casas ou apartamentos:

- (1) salas pequenas vivas (banheiros)
- (2) salas grandes vivas (garagens ou salas de estar)
- (3) salas pequenas secas (*closets*)
- (4) salas grandes secas (dormitórios)

Todas as casas são diferentes, o que torna necessário fazer certas adaptações: por exemplo, se sua sala de estar possui carpete e seu dormitório possui assoalho você poderia revezar os ambientes. É necessário, primeiramente, fazer uma avaliação dos ambientes disponíveis e colocá-los nas quatro categorias descritas acima.

Devemos entender que instrumentos musicais diferentes soam melhor quando tocados e gravados em certos ambientes acústicos, por exemplo, não existe melhor lugar para gravar o baixo elétrico que num espaço seco, ou então, que gravar um violão num banheiro dá um resultado mais rico do que gravar num closet.

Depende muito de qual resultado a produção requer de uma produção fonográfica. O produtor/técnico deveria sempre pensar à frente, mentalizar a mixagem final da música; o técnico/produtor precisa também decidir o quanto da ambiência quer captar: quanto mais próximo o microfone estiver da fonte menos o ambiente será captado. Mas mesmo fazendo microfonação próxima deveria-se considerar a captação da acústica da sala inteira e mesmo assim deveria-se otimizar a sala acusticamente em relação ao instrumento ou produção. Também deveria ser lembrado que, no pior dos casos, pode-se adicionar ambiência após a gravação com o uso de um processador, quando o som captado não pode ser removido. Mas esta prática deveria ser evitada, pois, como o som do ambiente natural tem uma vantagem sonora muito forte, é necessário estar ciente da sua mixagem final para poder aproveitá-lo ao máximo.

O que deve ser seguido são técnicas de captação que, se comprovarem ser úteis e valiosas, não deveriam ser interpretadas como regras. Além do mais, o leitor deveria procurar por soluções próprias e até mais interessantes.

## 2. SALA PEQUENA VIVA - NO CHUVEIRO

### 2.1 Voz em salas pequenas vivas

Porque as pessoas cantam no chuveiro? Em parte por causa da ambiência: um chuveiro com azulejos produz uma reverberação rica, similar às câmeras de reverberação usadas nas gravações antigas. Os banheiros são os melhores amigos do proprietário de um *Home-studio* para captar um *reverb* natural. A captação de vocais é um dos mais usados neste contexto. É necessário posicionar o vocalista e o microfone com muito cuidado para não captar mais ambiência do que o sinal direto da voz:

Tirar a cortina do chuveiro. Se o chuveiro possui portas de correr o resultado não é tão bom, pois é preciso uma abertura completa para isso. Coloca-se o cantor perto da parede dos fundos e no centro do chuveiro ou banheira, sendo que o microfone deve estar posicionado de vinte a trinta centímetros em frente ao vocalista e aproximadamente quinze a vinte centímetros acima da cabeça, com a cápsula direcionada à boca num ângulo de aproximadamente trinta graus. É necessário movimentar o microfone para achar o *'sweet spot'* e monitorar com fones de ouvidos quando posicionar o microfone (por exemplo o *Sennheiser 600*). Em caso de estar com reflexões demais, pode-se pendurar um cobertor ou outro material absorvente na parede atrás do cantor, em sua frente ou nas paredes laterais, permitindo eliminar reflexões não-desejadas.

### 2.2 Violões em salas pequenas vivas

Violões também soam bem em banheiros: posiciona-se o violonista no meio do chuveiro, numa cadeira de bar, no mesmo lugar que o vocalista anterior; coloca-se microfone inferior, aproximadamente cinco a oito centímetros do violão, pois, utilizando-se do microfone superior, há reflexões demais do piso do chuveiro. Geralmente, um bom lugar seria colocar o microfone na base dos trastes, mas seria preciso monitorar com fones de ouvido. Se for necessário gravar violonista e voz simultaneamente, pode-se usar dois microfones: coloque um *'baffle'* pequeno entre eles, do tipo cartolina.

### 2.3 Guitarras em salas pequenas vivas

Uma aplicação garantida é gravar o amplificador da guitarra no chuveiro, usando volume alto: verifica-se a situação com os vizinhos, pois, se bem feito, pode ter um som gigantesco; coloca-se o amplificador no meio do banheiro, contra a parede, direcionado ao centro da sala. São necessários dois microfones: um dinâmico, de aproximadamente dois centímetros do cone do speaker e outro, condensador, localizado a um metro do speaker. Gravam-se os sinais em duas pistas separadas para poder misturar no *mix* depois. Para um som ainda maior, coloque mais microfones de ambiente na parte oposta da sala, direcionando-os para baixo num ângulo de 45 graus. Esse procedimento realiza uma boa imagem de estéreo que pode ser misturada posteriormente ao microfone dinâmico para encorpar o som. Verifica-se o cancelamento de fase somando-se as pistas em mono através do botão de mono ou colocando-se no mesmo pan L/R.

### 3. SALA GRANDE VIVA - A SALA DE ESTAR

Um banheiro grande pode ser usado para muitas aplicações, mas pode ser que a bateria não caiba. É necessário verificar se há uma sala de estar grande, cujo piso seja liso e com pe direito alto. Em caso de não haver, a garagem ou qualquer outro espaço que não esteja lotado com materiais absorventes pode ser adaptado. Deve-se lembrar que, quanto menor o espaço, mais os materiais absorventes vão atenuar o ambiente. De qualquer forma, transforme a maior sala disponível em sua sala ambiente.

#### 3.1 Vocais em salas grandes vivas

O famoso sofá de canto: o sofá-L no canto da sala deixa o cantor confortável, possibilita um o som bem firme (*tight*) e absorve as reflexões. Para captar uma boa imagem de estéreo coloque o vocalista mais alto no centro dos sofás, longe dos microfones; coloque um par de microfones condensadores, aproximadamente 1.5m à frente dos sofás, com os microfones direcionados num ponto atrás do cantor central. Existem várias maneiras de montar isso, com diversas pessoas, mas procure sempre equilibrar a imagem de estéreo; isso também funciona para outros conjuntos instrumentais de vários tipos e tamanhos.

#### 3.2 Instrumentais em salas grandes vivas

Santana gravou os primeiros discos colocando as percussões num ginásio de esportes. Deveríamos colocar a percussão e/ou bateria na maior sala possível. Instrumentos únicos, como 'shakers', congas, etc. soam melhor com microfonação próxima e condensadores, mas, ao gravar uma seção de percussão, seria bom gravar também a ambiência. Uma maneira boa de captar um *set-up* de percussão grande seria microfonar por cima: usa-se um par de microfones estéreo e coloca-se o mais alto possível do instrumentista, através de fita crepe. Deve-se lembrar que quanto mais longe os microfones da fonte, mais distante eles tem que estar entre eles para preservar a imagem de estéreo e ficar livre de efeitos de fase não-desejados.

#### 3.3 Bateria em salas grandes vivas

Coloca-se a bateria na parede olhando para o centro da sala e fixa-se um cobertor na parede atrás da bateria. A microfonação depende do tamanho da sua sala: em salas grandes seria recomendado fazer a captação utilizando uma microfonação próxima à bateria e colocar dois pares de condensadores – um par acima da bateria e outro no lado oposto da sala; coloca-se o par oposto aproximadamente 30 cm acima do prato maior e faceta-se o kit, formando um triângulo equilátero com a bateria. Ao trabalhar com salas menores, pode-se utilizar quatro microfones: um no *kick*, outro na caixa, e um par para *overhead*. Pode-se, ainda, adicionar um par de microfones de ambiente - se for feito corretamente, a sensação é de estar dentro da sala com a bateria.

#### 3.4 Guitarras em salas grandes vivas

Pode-se criar *reverb* natural usando grandes espaços vivos, a técnica é parecida com a gravação da guitarra elétrica no banheiro: coloca-se a amplificadora num canto, um microfone dinâmico e um par de microfones condensadores em frente ao amplificador para capturar ambiência; deve-se tirar todos os moveis que possam atenuar as reflexões desejadas.

### 4. SALA PEQUENA SECA - O CLOSET

Um closet é um espaço muito valioso para *home-studios* se for necessário um som seco, pois possibilita gravar praticamente todo tipo de som. A melhor parte é que não é necessário movimentar

muitos móveis para fazer esta gravação; sua aplicação mais famosa é gravar o amplificador do baixo elétrico.

Para melhores resultados, coloca-se o baixo contra a parede dos fundos do closet, evitando-se cantos por causa das ondas estacionárias, uma vez que o som continuará reverberando muito tempo em frequências graves. Para gravar o baixo, pode-se misturar DI (*direct box*), microfone dinâmico e microfone condensador. O microfone dinâmico -pode-se usar os mesmos dos *kick* - é colocado diretamente em frente ao gabinete; o condensador, ou o microfone dinâmico, é colocado aproximadamente um metro do speaker (se for necessário usar um dinâmico, pode-se captar um baixo bem '*punchy*'; se for condensador, capta-se um baixo com mais peso nos graves. O segundo microfone é importante, como nas frequências graves do baixo elétrico na qual as ondas graves precisam de um espaço maior para ser captado, mas o primeiro microfone não deve ser descartado, pois ele capta o '*punch*' das cordas, sem ele o baixo fica um '*rumble*'. O Baixo também pode ser gravado em dormitórios que tenham carpete – especialmente se o baixista trouxer a torre de caixas, tocada em volumes altos, típica de produções de musica rock.

### 4.1 Voz e guitarra em salas pequenas secas

Pode-se colocar o vocalista em frente ao closet se quiser um vocal de guia, que muitas vezes se grava bem seca – com pouca reverberação - ou se a música requerer um som seco: coloca-se o cantor em frente ao closet e o microfone da mesma forma que no banheiro, explicado anteriormente. Pode-se também colocar a guitarra através da aplicação de mais cobertores perto do microfone e do amplificador para tirar mais ainda as reflexões.

## 5. SALA GRANDE SECA - O DORMITÓRIO

Uma das maneiras mais seguras de gravar a bateria é no dormitório, sem usar microfonação próxima em todo kit. Há sonoridades muito interessantes em salas grandes secas que se cria o efeito de '*killer drum sound*'. Como a bateria é difícil de gravar e de mixar, é muito recomendado começar por captações secas que dão mais flexibilidade à mixagem. *Set-up* típica: coloca-se a bateria contra a parede num quarto com carpete, de preferência com pé direito baixo; coloca-se um microfone no *kick* e outro na caixa, assim como dois '*overheads*' acima facetando a bateria. Os microfones podem ser mistos, sendo que aquele situado ao lado do surdo pode ter uma resposta maior nos graves; deve-se evitar colocar alto demais para não perder o *sustenido* dos *tom-tons*, entretanto, se for colocado baixo demais pode-se captar efeitos de fase quando os pratos forem tocados. Através deste procedimento, a bateria soará cheia (*fat*) e *powerful*, possibilitando flexibilidade total na mixagem para fazer ajustes. Uma maneira mais econômica seria trabalhar somente com três microfones: um no *kick* e um par de estéreos facetando a bateria do meio da sala, possibilitando captar um som com muito mais detalhes. Também pode-se verificar o *delay* que porventura venha a surgir entre o *kick* e os microfones de ambiência e corrigir-los posteriormente com *delay* eletrônico.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Juntando tudo

Algumas complicações podem surgir quando for necessário gravar a banda inteira ou, no mínimo, a seção rítmica. O ideal, nesta situação de *home-studio*, seria captar cada instrumento com uma acústica separada. Para fazer isso é preciso isolar fisicamente cada instrumento, especialmente se forem usados microfones condensadores sensíveis. O mais difícil a isolar é a bateria, especialmente por causa de seu volume.

Como uma casa tem muitos ambientes acústicos diferentes não é tão difícil de conseguir uma boa isolamento ou separação acústica; a solução mais óbvia seria colocar cada instrumento num ambiente diferente da casa, p.ex., a bateria no quarto, a guitarra rítmica no banheiro e o baixo no closet do outro quarto: juntam-se todos os músicos no local da bateria usando fones de ouvidos. Claro que seriam precisos vários metros de cabos, mas o vazamento é o mínimo possível.

### 6.2. Alternativas

Se não for possível separar todas os instrumentos, pode-se tentar trabalhar com '*baffles*': coloca-se *baffles* em redor da bateria, colocam-se as caixas o mais longe possível e os '*baffles*' neles, gravando o baixo direto. Se houver um vocalista, deve-se coloca-lo numa sala diferente com fones de ouvidos. Pode-se construir '*baffles*' com coisas achadas em casa: colchões e *futons* são ótimos '*baffles*'; venezianas também podem ser usadas, especialmente se forem colocados cobertores

acima. Sacos de dormir e carpetes são úteis para separar *amps* de guitarra, *kick*, etc; pode-se ainda construir um *baffle* usando uma madeira compensada cobrindo-a com material absorvente: pode-se cortar duas peças e colocar dobradiças para que fique em pé; este procedimento é ainda melhor pois separa por tempo, isto é, grava as coisas todas em '*overdubs*' e depois junta no *mix*.

### 6.3 Em estúdios

Quem trabalha em estúdio pode usar o banheiro no lugar de sala pequena viva, a recepção ou as escadas no lugar da sala grande viva, o *soundlock* como sala pequena seca. Muitas vezes um estúdio de gravação não possui todos os recursos encontrados numa casa e é por isso que incorporamos a nossos projetos acústicos de estúdios uma fiação '*open-ended*' permitindo incluir outros ambientes acústicos de casa - como a recepção, a copa e o banheiro - parecidos àqueles tratados neste artigo.

## 7. CONCLUSÃO

Gravar instrumentos acústicos é um dos maiores desafios na produção de um CD, mas com conhecimento acústico pode-se conseguir resultados incríveis. O segredo é estar familiarizado com vários elos de captação, que consiste em relação não só aos instrumentos e aos microfones, mas aos vários espaços acústicos também. Ter domínio acústico é uma das ferramentas que possibilita elevar as gravações dos nossos artistas a um nível profissional comparado aos grandes estúdios. A quantidade de espaços acústicos diferentes encontrados numa casa é muito grande – obtivemos excelentes resultados com a utilização de pias, fogões e geladeiras - portanto o limite é a própria criatividade.

## 8. BIBLIOGRAFIA CITADA

Neves, Adinaldo. 1998. Mix. 'Music Recording in Brazil Hot Sounds, Big Business'.



# ESTUDO CIENTÍFICO DE ESCALAS E TEMPERAMENTOS COM CENTO E COMAS

**Hidetoshi Arakawa**

Unicamp

e-mail: arakawah@correionet.com.br

Resumo: Criado por Ellis em 1864, a notação do cento foi adotada no estudo de escala e temperamento, ao lado da tradicional razão de freqüências. A vantagem do cento é a visualização da posição da nota na escala e da distância entre notas. Como cento é expoente, a distância entre notas é calculada com simples adição ou subtração. Uma das desvantagens do cento é que os valores expressados são aproximados e não exatos, exceto no igual temperamento. Por causa disto, o cento não é reversível à razão de freqüências, valor exato. Outra desvantagem é a necessidade de cálculo logarítmico com calculadora científica ou computador para transformar a razão de freqüências em cento. É milenar o uso de comas no estudo de escalas e temperamentos. Apesar do menosprezo das pessoas do ramo das ciências exatas, as comas são baseadas nas razões das freqüências com valores exatos. O mérito das comas está na demonstração das estruturas de escalas e temperamentos: a coma pitagórica, da estrutura da escala pitagórica e suas derivadas; a coma sintônica, do médio tom e suas derivadas. No estudo de escalas e temperamentos há os termos 'diese menor' e 'diese maior'. O diese menor é a diferença entre uma oitava e três terças maiores puras. O diese maior é a diferença entre quatro terças menores puras e uma oitava. Todos os especialistas do ramo expressam dieses em centos. Para maior precisão, utilizam valores com grande número de casas. Mas esses autores desconhecem que o valor do diese menor é três comas sintônicas menos uma coma pitagórica e de diese maior, quatro comas sintônicas menos uma coma pitagórica. O fato demonstra um problema grave no método de estudo. Em 1980, o autor apresentou uma notação de intervalos musicais com cento e comas. A notação é composta de distância entre notas do igual temperamento (múltiplos de 100) mais discrepância expressada em comas. A vantagem desta notação é que, além da visualização da distância entre notas, ela é reversível à razão de freqüências. Isto significa que a expressão cento com comas resulta em valor exato. Esta notação é aplicável às escalas e temperamentos tradicionais. Para converter formas expressadas em cento com comas para cento convencional, são necessários apenas os valores em centos das duas comas. A forma convertida para centos é o valor aproximado, e não exato. Desde que seja apenas para visualização, não necessita de grande número de casas.

Tradicionalmente, no estudo de escalas e temperamentos utilizava-se o cálculo de razão de freqüências, a qual resulta em valor exato. Mais tarde adotou-se, concomitante à razão de freqüências, a notação do cento, criada por Ellis.

Uma unidade do cento é definida da seguinte maneira

$$\text{cento} = 2^{\frac{1}{1200}}$$

A razão de freqüências é convertida a cento como segue

$$2^{\frac{n}{1200}} = \frac{A}{B}$$
$$\log_{10} 2^{\frac{n}{1200}} = \log_{10} \frac{A}{B}$$
$$n = \frac{1200}{\log_{10} 2} \log_{10} \frac{A}{B}$$

A principal vantagem do cento é a visualização, já que a posição das notas na escala e as distâncias entre notas no temperamento igual ficam múltiplos de cem. Como cento é expoente, a distância entre notas é calculada simplesmente com adição ou subtração. Este método apresenta, no entanto, duas desvantagens: a) a necessidade de cálculo logarítmico com calculadora científica, ou

computador, para converter razão de freqüências a cento; b) os valores expressos são aproximados, exceto no temperamento igual. Por este motivo o cento não é reversível à razão de freqüências, valor exato.

Exemplo: o valor em cento de uma quinta pura  $V$  de 2:3 é

$$V = 701,95500086\dots$$

A terça maior pura  $III$  de 4:5 é

$$III = 386,31371386\dots$$

As Comas são de uso milenar no estudo de escalas e temperamentos. Apesar de geralmente menosprezadas pelo pessoal do campo das ciências exatas, elas se baseiam nas razões das freqüências e seus valores são, portanto, exatos. Seu mérito consiste na demonstração das estruturas de escalas e temperamentos: a coma pitagórica na estrutura da escala pitagórica e suas derivadas; a coma sintônica na do médio tom e suas derivadas.

Coma pitagórica é a diferença entre doze quintas puras e sete oitavas.

Coma pitagórica  $P$  expressa-se por

$$P = (3^{12} \cdot 2^{-19})$$

Seu valor em cento é aproximadamente 23,46001038....

Coma sintônica é a diferença entre a terça maior pitagórica e a terça maior pura.

A expressão em razão da coma sintônica  $K$  é

$$K = (5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4})$$

Seu valor em cento é aproximadamente 21,50628959....

Apresentamos, em 1980, uma notação de intervalos musicais com cento e comas, a qual compõe-se de distâncias entre notas do temperamento igual (múltiplos de 100) mais discrepância expressada em comas. Tem como vantagem, além da visualização da distância entre notas, a reversibilidade à razão de freqüências. Esta notação aplica-se a escalas e temperamentos, sendo sua razão de freqüências expressada na fórmula

$$5^m \cdot 3^n \cdot 2^o$$

A coma pitagórica  $P$  em forma de cento, diferença entre doze quintas puras  $V$  e sete oitavas  $VIII$ , expressa-se por

$$12V - 7VIII = P$$

$$12V = 7 \times 1200 + P$$

A quinta pura  $V$  fica

$$12V = 7 \times 1200 + P$$

$$V = 700 + \frac{1}{12}P$$

A quinta pura  $V$  é reversível à razão da seguinte forma

$$\begin{aligned} V &= 2^{\frac{700}{1200}} (3^{12} \cdot 2^{-19})^{\frac{1}{12}} \\ &= 3 \cdot 2^{-1} \end{aligned}$$

Para formar a escala pitagórica cromática com círculo fechado, uma das quintas  $V_{PL}$  fica

$$\begin{aligned} V_{LP} &= 7VIII - 11V \\ &= 7 \times 1200 - 11 \left( 700 + \frac{1}{12}P \right) \\ &= 700 - \frac{11}{12}P \\ &= 700 + \frac{1}{12}P - P \end{aligned}$$

A quinta  $V_{PL}$  é uma coma pitagórica menor que a pura.

Na escala pitagórica, Si-Dó é semitom diatônico  $T_{SDP}$ , calculado da seguinte forma

$$\begin{aligned} T_{SDP} &= 3VIII - 5V \\ &= 3 \times 1200 - 5 \left( 700 + \frac{1}{12}P \right) \\ &= 100 - \frac{5}{12}P \end{aligned}$$

Dó-Dó# é o semitom cromático  $T_{SCP}$  e fica como segue

$$\begin{aligned} T_{SCP} &= 7V - 4VIII \\ &= 7 \left( 700 + \frac{1}{12}P \right) - 4 \times 1200 \\ &= 100 + \frac{7}{12}P \end{aligned}$$

A diferença de tamanho entre o semitom diatônico  $T_{SDP}$  e o semitom cromático  $T_{SCP}$  calcula-se assim

$$\begin{aligned} T_{SCP} - T_{SDP} &= (7V - 4VIII) - (3VIII - 5V) \\ &= 12V - 7VIII \\ &= P \end{aligned}$$

Também é coma pitagórica, diferença entre doze quintas pura e sete oitavas.

A terça maior pitagórica  $III_P$  é formada com quatro quintas puras  $V$  e expressa-se por

$$\begin{aligned} III_P &= 4V - 2VIII \\ &= 4 \left( 700 + \frac{1}{12}P \right) - 2 \times 1200 \\ &= 400 + \frac{4}{12}P \end{aligned}$$

A terça maior pura  $III$  é uma coma sintônica menor que a terça maior pitagórica e é representada por

$$III = 400 + \frac{4}{12}P - K$$

A terça maior pura *III* expressada em cento e coma é reversível à razão da seguinte forma

$$\begin{aligned} III &= 2^{\frac{400}{1200}} \left( 3^{12} \cdot 2^{-19} \right)^{\frac{4}{12}} \left( 5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4} \right)^{-1} \\ &= 5 \cdot 2^{-2} \end{aligned}$$

A terça maior pura *III* de duas oitavas acima é formada com quatro quintas  $V_0$  e expressa-se da seguinte maneira

$$4V_0 = III + 2VIII$$

O tamanho da quinta  $V_0$  é calculado com a fórmula

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{III + 2VIII}{4} \\ &= \frac{\left( 400 + \frac{4}{12}P - K \right) + 2 \times 1200}{4} \\ &= 700 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K \end{aligned}$$

É reversível à razão da seguinte maneira

$$\begin{aligned} V_0 &= 2^{\frac{700}{1200}} \left( 3^{12} \cdot 2^{-19} \right)^{\frac{1}{12}} \left( 5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4} \right)^{-\frac{1}{4}} \\ &= 5^{\frac{1}{4}} \end{aligned}$$

Esta quinta  $V_0$  é do médio tom; os valores de todas as notas do médio tom são calculados somando-se as quintas.

Uma oitava *VIII* menos três terças puras *III* constitui a diése menor  $D_m$ , expressada da seguinte forma

$$\begin{aligned} D_m &= VIII - 3III \\ &= 1200 - 3 \left( 400 + \frac{4}{12}P - K \right) \\ &= 3K - P \end{aligned}$$

Esta é a definição da diése menor.

O valor do diése menor  $D_m$  expressado em razão calcula-se como segue

$$\begin{aligned} D_m &= \left( 5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4} \right)^3 \left( 3^{12} \cdot 2^{-19} \right)^{-1} \\ &= 5^{-3} \cdot 2^7 \end{aligned}$$

A terça pura *III* é expressada por

$$III = 4V_0 - 2VIII$$

A fórmula da diése  $D_m$  menor é modificada do seguinte modo

$$\begin{aligned} D_m &= VIII - 3III \\ &= VIII - 3(4V_0 - 2VIII) \\ &= 7VIII - 12V_0 \end{aligned}$$

A diése menor é a diferença entre sete oitavas e doze quintas do médio tom.

Uma quinta  $V_1$  do médio tom é chamada de quinta de lobo e calcula-se da seguinte maneira

$$\begin{aligned} V_L &= 7VIII - 11V_0 \\ &= 7 \times 1200 - 11 \left( 700 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K \right) \\ &= 700 - \frac{11}{12}P + \frac{11}{4}K \\ &= \left( 700 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K \right) + 3K - P \end{aligned}$$

A quinta de lobo  $V_1$  do médio tom é  $3K-P$  maior que a quinta normal  $V_0$ .

A diferença de tamanho entre o semitom diatônico do médio tom  $T_{SDM}$  e o semitom cromático  $T_{SCM}$  é calculada da seguinte forma

$$\begin{aligned} T_{SDM} - T_{SCM} &= (3VIII - 5V_0) - (7V_0 - 4VIII) \\ &= 7VIII - 12V_0 \\ &= 7 \times 1200 - 12 \left( 700 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K \right) \\ &= 3K - P \end{aligned}$$

A diferença entre os semitons diatônico e cromático do médio tom também é diése menor. Ao contrário do que ocorre na escala pitagórica, o semitom diatônico é maior que o semitom cromático.

A diferença entre três terças menores puras e uma oitava é chamada de diése maior  $D_M$  e fica

$$\begin{aligned} D_M &= 4III_m - VIII \\ &= 4 \left( 300 - \frac{3}{12}P + K \right) - 1200 \\ &= 4K - P \end{aligned}$$

O valor da diése menor expressado em razão calcula-se assim

$$\begin{aligned} D_M &= (5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4})^4 (3^{12} \cdot 2^{-19})^{-1} \\ &= 5^{-4} \cdot 3^4 \cdot 2^3 \end{aligned}$$

A terça menor pura  $III_m$  de razão de 5:6 é igual a uma oitava menos uma sexta maior pura  $VI$  de 3:5, e demonstra-se da seguinte forma

$$\begin{aligned} III_m &= VIII - VI \\ &= 1200 - \left(900 + \frac{3}{12}P - K\right) \\ &= 300 - \frac{3}{12}P + K \end{aligned}$$

Modificada, a fórmula da diése maior fica:

$$\begin{aligned} D_M &= 4III_m - VIII \\ &= 4(VIII - VI) - VIII \\ &= 3VIII - 4VI \\ &= 3 \times 1200 - 4\left(900 + \frac{3}{12}P - K\right) \\ &= 4K - P \end{aligned}$$

A diferença entre três oitavas e quatro sextas puras também é diése maior.

Todos os trabalhos sobre escalas e temperamentos tratam das dièses menor e maior com razão de freqüências e com centos convencionais, porém nenhum autor apresenta fórmulas tão simples como as acima mencionadas.

Helmholtz, fundador da acústica musical moderna, não empregou o termo coma na explicação de escalas e temperamentos, mesmo tendo aplicado a tabela de Oettingen (embora ela não apareça em seu livro). Por este motivo o livro é de difícil compreensão e o próprio Helmholtz tem dificuldade em explicar a quinta criada por ele.

Uma das fórmulas usadas em seu estudo de escalas é a seguinte

$$8V + III - 5VIII = S$$

Schisma  $S$  é a diferença entre as comas pitagórica e sintônica e expressa-se por

$$S = P - K$$

A fórmula em razão do schisma é

$$\begin{aligned} S &= \left(3^{12} \cdot 2^{-19}\right) \left(5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4}\right)^{-1} \\ &= 5 \cdot 3^8 \cdot 2^{-15} \end{aligned}$$

Subtraindo-se um oitavo de schisma de oito quintas puras  $V$  fica o seguinte

$$8\left(V - \frac{1}{8}S\right) + III - 5VIII = 0$$

Uma quinta desta  $V_H$  é a quinta usada no instrumento construído por Helmholtz. Ela se expressa por

$$\begin{aligned}
 V_H &= V - \frac{1}{8}S \\
 &= \left(700 + \frac{1}{12}P\right) - \frac{1}{8}(P - K) \\
 &= 700 - \frac{1}{24}P + \frac{1}{8}K \\
 &= 700 - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K\right)
 \end{aligned}$$

A razão desta quinta é calculada da seguinte forma

$$\begin{aligned}
 V_H &= 2^{\frac{7}{12}}\left(3^{12} \cdot 2^{-19}\right)^{-\frac{1}{24}}\left(5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4}\right)^{\frac{1}{8}} \\
 &= 5^{-\frac{1}{8}} \cdot 2^{\frac{7}{8}}
 \end{aligned}$$

O temperamento de Helmholtz é um raro exemplo de mudança simultânea de dois parâmetros: comas pitagórica e sintônica. No método convencional, esta mudança é praticamente impossível. Por exemplo: uma quinta  $V_{DC}$  formada com uma quinta de médio tom mais um doze avos de coma pitagórica fica o seguinte

$$\begin{aligned}
 V_{DC} &= \left(700 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K\right) + \frac{1}{12}P \\
 &= 700 + \frac{2}{12}P - \frac{1}{4}K
 \end{aligned}$$

A quinta  $V_{DC}$  expressada em razão fica

$$\begin{aligned}
 V_{DC} &= 2^{\frac{7}{12}}\left(3^{12} \cdot 2^{-19}\right)^{\frac{2}{12}}\left(5^{-1} \cdot 3^4 \cdot 2^{-4}\right)^{-\frac{1}{4}} \\
 &= 5^{\frac{1}{4}} \cdot 3 \cdot 2^{-\frac{19}{12}}
 \end{aligned}$$

A discrepância entre sete oitavas e doze quintas é

$$\begin{aligned}
 7VIII - 12V_{DC} &= 7 \times 1200 - 12\left(700 + \frac{2}{12}P - \frac{1}{4}K\right) \\
 &= 3K - 2P
 \end{aligned}$$

Somando-se os valores em cento e comas destas quintas, podem ser facilmente calculados os valores das notas de uma escala; em razão isto seria extremamente difícil.

Para análise de escalas e temperamentos usa-se o círculo de quinta. A unidade de divisão do círculo de quinta convencional é a quinta pura e as discrepâncias são notadas em relação a ela. A soma das discrepâncias é uma coma pitagórica negativa.

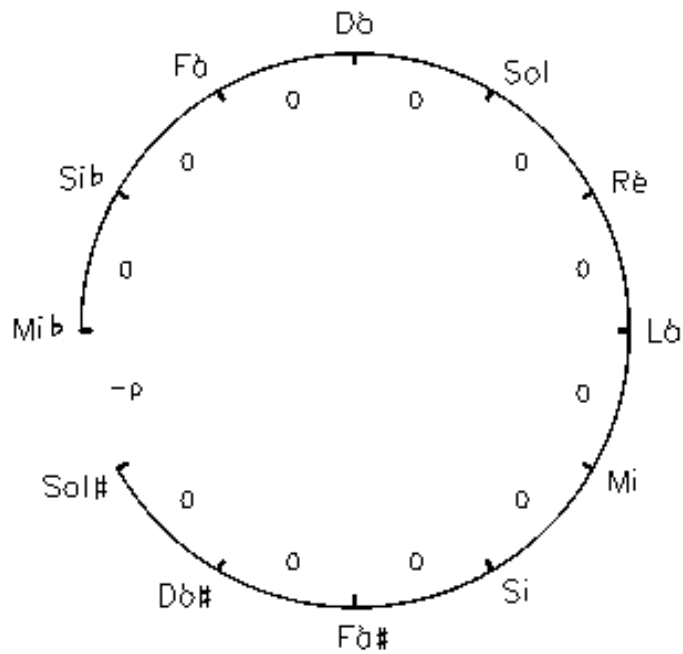


Figura 1: Círculo de quinta convencional da escala pitagórica

Em seu círculo de quinta o autor adotou a quinta do temperamento igual, equivalente a 700 centos, e a soma das discrepâncias é zero. A vantagem deste círculo sobre o convencional é a facilidade do cálculo da distância entre duas notas. O valor expressado em cento e comas é múltiplo de cem mais a soma das discrepâncias entre duas notas. A Fig. 1 é o círculo de quinta convencional da escala pitagórica e a Fig. 2 é círculo de quinta da escala pitagórica criado pelo autor.

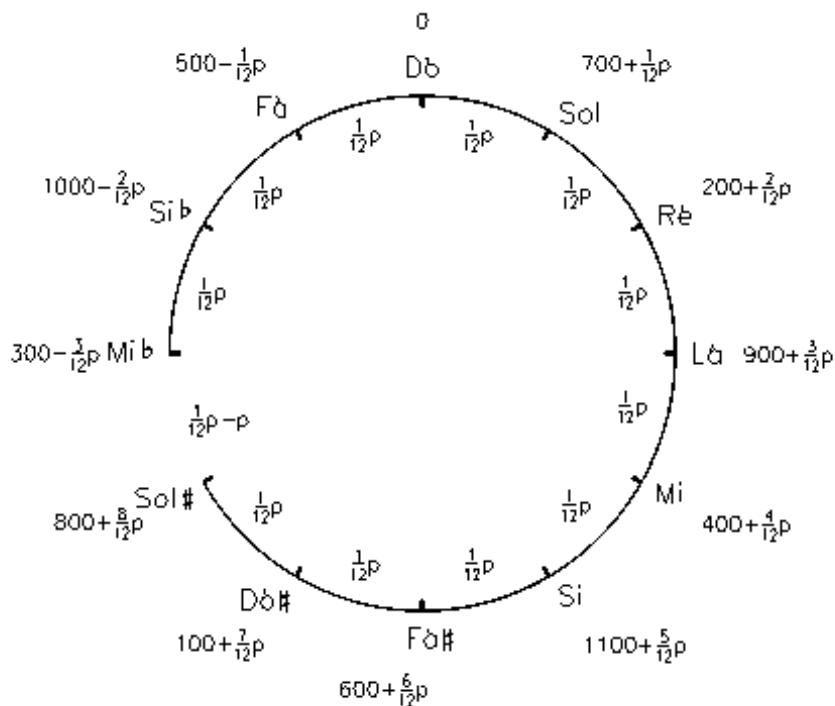


Figura 2: Círculo de quinta da escala pitagórica criado pelo autor

As fórmulas expressadas em cento com comas é conversível à expressão convencional de cento. Para tanto, são necessários apenas os valores em centos das duas comas.

Para transformar razão em cento é preciso ter os valores em cento dos números 3 e 5.

A quinta pura  $V$  de uma oitava acima na razão de 1:3 é



$$\begin{aligned} V + VIII &= 700 + \frac{1}{12}P + 1200 \\ &= 1900 + \frac{1}{12}P \end{aligned}$$

A terça maior pura III de duas oitavas acima na razão de 1:5 é

$$\begin{aligned} III + VIII &= \left(400 + \frac{4}{12}P - K\right) + 2 \times 1200 \\ &= 2800 + \frac{4}{12}P - K \end{aligned}$$

Para calcular cento  $I_{\text{cento}}$  da razão  $5^m \cdot 3^n \cdot 2^o$  emprega-se a expressão

$$I_{\text{cento}} = m \left(2800 + \frac{4}{12}P - K\right) + n \left(1900 + \frac{1}{12}P\right) + o \times 1200$$

Por exemplo: a quinta de lobo do médio tom  $V_1$  é expressa por

$$V_1 = 5^{-\frac{11}{4}} \cdot 2^7$$

A quinta  $V_1$  é convertida a cento do seguinte modo

$$\begin{aligned} V_1 &= -\frac{11}{4} \left(2800 + \frac{4}{12}P - K\right) + 7 \times 1200 \\ &= 700 - \frac{11}{12}P + \frac{11}{4}K \\ &= \left(400 + \frac{1}{12}P - \frac{1}{4}K\right) + 3K - P \end{aligned}$$

A razão da diése maior  $D_M$  é

$$D_M = 5^{-4} \cdot 3^4 \cdot 2^3$$

Diése maior  $D_M$  é convertida a cento da seguinte maneira

$$\begin{aligned} D_M &= -4 \left(2800 + \frac{4}{12}P - K\right) + 4 \left(1900 + \frac{1}{12}P\right) + 3 \times 1200 \\ &= 4K - P \end{aligned}$$

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Arakawa, H., Notação de Intervalos Musicais' 32ª. Reunião anual da SBPC, Rio de Janeiro, 1980.
- [2] Arakawa, H., Afinação e Temperamento: Teoria e Prática, Campinas, 1995.
- [3] Helmholtz, H., On the Sensations of Tone, Trans. A. Ellis, London, 1885.
- [4] Lloyd, L. S. and Boyle, H., Intervals, Scales and Temperaments, London, 1963.
- [5] Oettingen, A., Harmoniesystem in dualer Entwickelung, Dorpat, 1866.

# ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE RESPOSTA IMPULSIVA

Bruno Sanches Masiero<sup>a</sup> & Fernando Iazzetta<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Música, ECA/USP

<sup>b</sup>Departamento de Engenharia de Telecomunicações, POLI/USP

e-mail: bruno.masiero@poli.usp.br, iazzetta@usp.br

Resumo: Este projeto faz uma revisão nas diferentes técnicas de medição da resposta impulsiva acústica e de alguns dos parâmetros físicos para acústica de sala. É feita uma revisão sobre sistemas lineares e invariantes no tempo e métodos de obtenção da resposta impulsiva acústica, com ênfase no método da seqüência de máximo comprimento e no método desenvolvido recentemente da varredura logarítmica. É feita uma revisão nos parâmetros acústicos para salas, assim como métodos de processamento da resposta impulsiva para sua obtenção.

## 1. MÉTODOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICA DE SALAS

### 1.1 Métodos de Obtenção da Resposta Impulsiva

A resposta impulsiva acústica é uma função temporal da pressão sonora de um espaço acústico, que resulta da excitação desse espaço por uma função que se aproxima da função delta de Dirac [1]. A resposta impulsiva (IR) de um espaço acústico fornece uma descrição precisa desse sistema. Todos os parâmetros acústicos definidos pela norma ISO 3382 [2] são derivados diretamente da IR acústica.

A norma ISO 3381 faz algumas considerações importantes quanto à medição da IR acústica. Por definição, a IR acústica é medida com pares de emissor-receptor. Na acústica de salas, a IR obtida entre um receptor e um emissor caracteriza o sistema acústico entre a localização exata desses dois itens, mas essa IR não pode usada para caracterizar a resposta da sala como um todo. Para a obtenção dos parâmetros acústicos de uma sala, essa norma recomenda a medição da IR de da sala deve em um mínimo de dezoito posições distintas, posteriormente obtendo-se a média energética destas IR. Microfones e alto-falantes usados para este fim devem ser omnidirecionais.

Os principais métodos de medição acústica de salas são descritos a seguir.

#### 1.1.1 Excitação por Impulsos

A primeira idéia que vem à mente, para a obtenção da resposta impulsiva de uma sala, é excitá-la diretamente com um impulso. Este impulso pode ser criado de forma analógica, como, por exemplo, com disparos de armas de fogo. Como impecílho, este método apresenta uma baixa repetibilidade e reduzida relação-sinal-ruído (SNR). Para melhorar sua repetibilidade, o sinal pode ser gerado de modo digital e ser posteriormente convertido para um sinal analógico (via um conversor DA). A resposta obtida na sala quando excitada por esse sinal já é a própria IR, não sendo necessário nenhum pós-processamento. Para diminuir a influência de ruído, pode-se reproduzir o impulso periodicamente – tomando o cuidado do período entre dois impulsos ser maior que o tempo de reverberação da sala – e posteriormente realizar uma média temporal destas respostas.

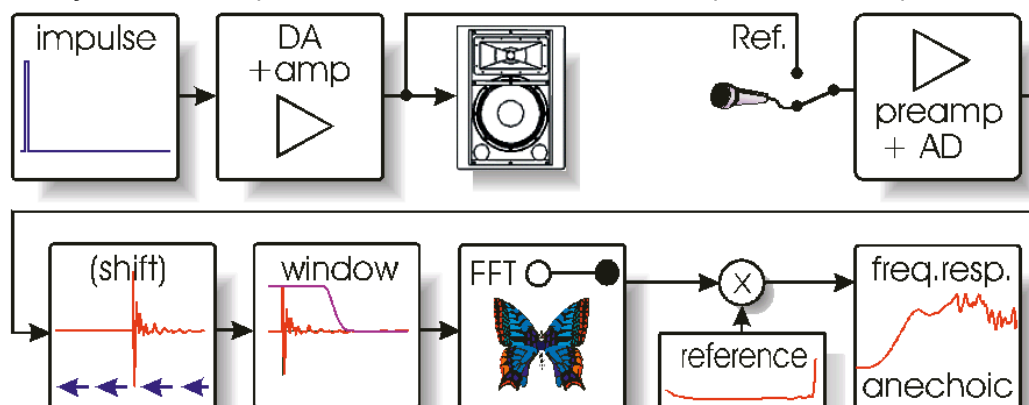


Figura1: Esquema do método de medição por impulso (ver [5])

Este é um método simples e rápido, mas também muito suscetível ao ruído [3]. O resultado irá sempre possuir um erro sistemático, uma vez que na prática é impossível gerar um impulso perfeito (espectro perfeitamente plano).

### 1.1.2 Excitação Estática

Este método pode ser considerado dual ao método do impulso. Ao invés de excitar-se a sala com um impulso (cujo espectro contém todas as frequências de interesse), excita-se a sala com uma seqüência de senóides, com suas respectivas frequências variando passo-a-passo. Existem várias possibilidades de reduzir-se a influência do ruído neste tipo de medição, entre elas, filtrar-se o sinal com um filtro passa-faixa estreito sintonizado para a frequência desejada (possível distorção de fase) ou, por meio de FFT, verificar a amplitude na frequência desejada (fundamental) – as frequências devem ser escolhidas de forma a evitar-se erro de cercamento. Esse último método é preferível em relação aos demais, uma vez que a amplitude da fundamental é claramente observável frente ao ruído.

A função de transferência é obtida comparando-se amplitude e fase da senóide recebida com a senóide enviada para as diversas frequências utilizadas. O passo de variação da frequência deve ser definido de acordo com a resolução desejada. Em medições acústicas, a variação de frequência costuma ser logarítmica. Deve-se notar que a resolução neste tipo de medição será muito inferior à das medições com sinais de banda larga.

A vantagem deste método se encontra na elevada SNR, uma vez que o sinal de excitação concentra toda sua energia em apenas uma faixa de frequência, garantindo boa precisão na medição. Sendo assim, apesar de demorado, este método é bastante útil para medidas de precisão. Com ele é possível também verificar um possível comportamento não-linear da sala, uma vez que possíveis harmônicas podem ser vistas claramente no espectro do sinal recebido.

### 1.1.3 Time Delay Spectrometry (TDS)

Seguindo a idéia da excitação estática, podemos agora usar uma senóide com frequência variando no tempo como sinal de excitação. No TDS usa-se então uma varredura linear de frequência.

Segundo Heyser [4], a função de transferência da sala pode ser obtida com um filtro passa-faixa estreito que tem sua frequência central variando na mesma taxa que o sinal de varredura. A implementação de um filtro como este é bastante complicada, logo é comum o uso de um banco de filtros estreitos sincronizados. Para evitar o uso destes filtros, pode-se multiplicar o sinal recebido pelo sinal enviado atrasado no tempo (de forma a compensar o tempo de propagação do som na sala) e posteriormente filtrar o produto por um filtro passa-baixa, como explicado por Muller & Massarani [5]. Com a escolha correta da taxa de variação e da frequência de corte do filtro, componentes provenientes de distorção harmônica podem ser eliminadas da medição – o que permite a esse método realizar medições de sistemas não lineares – assim como o ruído acima da frequência de corte do filtro.

Um outro problema do TDS é o efeito de batimento presente nas baixas frequências. Para se corrigir este problema, é sugerido por Vanderkooy [6] e Greiner [7] que se realize a medição num sistema dual, alimentado com um sinal em quadratura, ou seja, realizar uma varredura de cosseno e outra de seno, e depois somá-las. Com isso, a componente de soma é eliminada, restando somente o dobro da componente de diferença. Se os pontos de início das varreduras estiverem perfeitamente sincronizados, a diferença será sempre nula, e com isso a presença do filtro PB torna-se redundante e até inconveniente, uma vez que ele iria eliminar a influência das reflexões da sala na medida.

$$\cos(x) \cdot [h(f) \cdot \cos(y)] = h(f) \cdot \left\{ \frac{1}{2} [\cos(x - y) + \cos(x + y)] \right\}$$

$$\sin(x) \cdot [h(f) \cdot \sin(y)] = h(f) \cdot \left\{ \frac{1}{2} [\cos(x - y) - \cos(x + y)] \right\}$$

(1.1 – 1)

$$\cos(x) \cdot [h(f) \cdot \cos(y)] + \sin(x) \cdot [h(f) \cdot \sin(y)] = h(f) \cdot \cos(x - y)$$

O fato de excitar-se a sala com dois sinais distintos estenderá o tempo necessário para realizar-se a medição, mas ainda assim, se comparado com os demais métodos, o tempo necessário é consideravelmente pequeno. Esta repetição implica em melhoria da SNR, já que realiza-se uma média temporal do ruído.

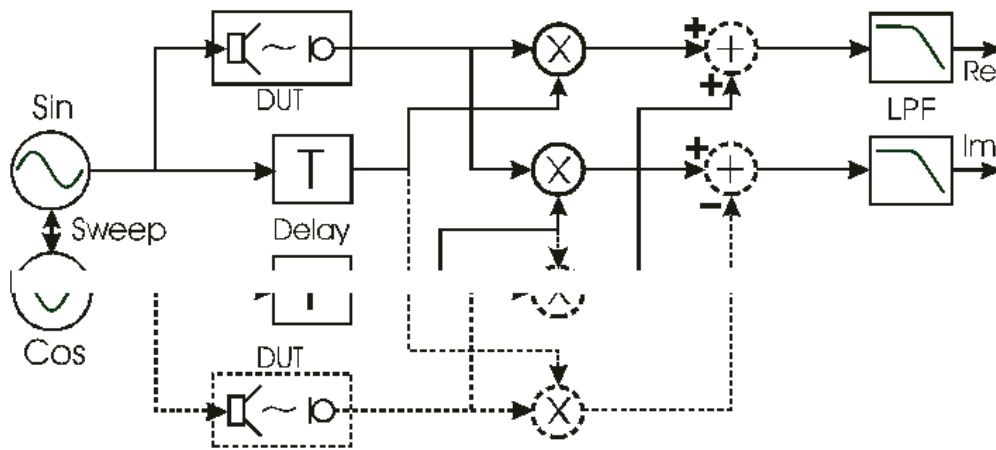


Figura 2: Esquema de medição do método TDS

A razão para o uso de uma variação linear no TDS é a diferença de frequência entre o sinal direto e as reflexões ser constante por toda a medição, mantendo assim a atenuação dessas componentes também constantes no tempo.

A varredura linear possui um espectro branco. Como o sinal apresenta maior energia na região aguda do espectro, existe uma tendência de uma reduzida SNR na região graves. Para corrigir-se este problema pode-se usar um sinal de excitação bastante longo ou realizar uma pré-ênfase do sinal.

#### 1.1.4 Maximum Length Sequences (MLS)

Expandindo a idéia do uso de uma seqüência periódica de impulsos do item 1.1.1 para uma seqüência aleatória, tem-se então um ruído como sinal de excitação. O método MLS utiliza um grupo especial de ruídos como sinal de excitação, as seqüências pseudo-aleatórias de máximo comprimento – dentre os ruídos, este é o que fornece a melhor SNR de acordo com [3]. Este método é bastante popular nos dias de hoje em todo o mundo.

A obtenção da IR a partir da MLS recebida pode ser realizada eficientemente por meio da Transformada Rápida de Hadamard (FHT). Devido a restrições de quantidade de memória e tempo de processamento, era de vital importância nos anos 70 e 80 o uso de métodos eficientes como a FHT. Com a velocidade dos computadores atuais, a técnica MLS já não apresenta vantagem significativa frente às demais técnicas.

O método MLS é bastante vulnerável à não-linearidades do meio, tornando seu uso desaconselhável para medição de grandes espaços abertos.

O MLS, assim como o TDS, possui um espectro branco, ou seja, menos energia nos graves que nos agudos, o que pode ser contornado com a pré-ênfase do sinal [5].

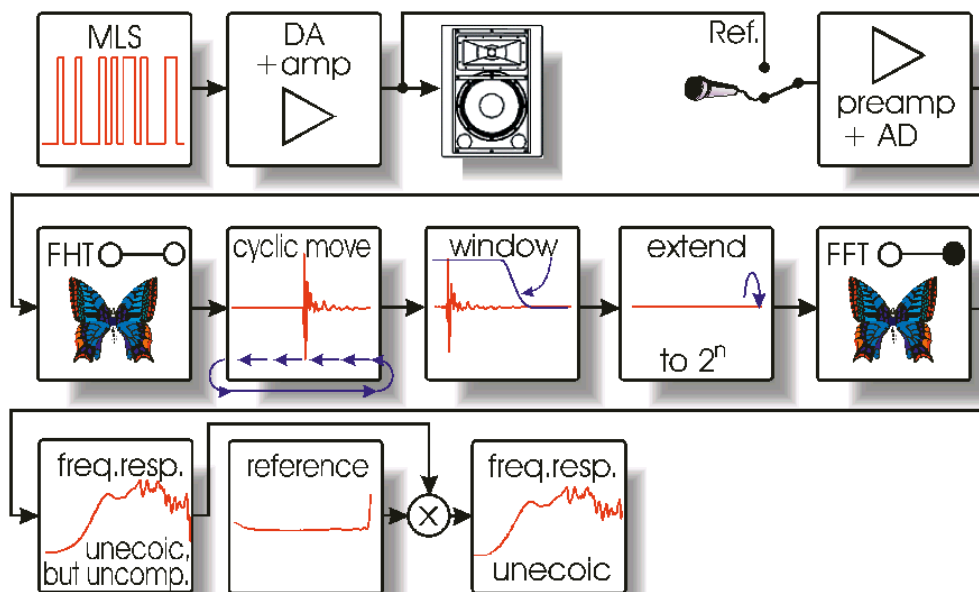


Figura 3: Esquema do método MLS (ver [5])

### 1.1.5 Análise por FFT

Esta é a única técnica que permite realizar medições acústicas durante uma apresentação musical, usando como sinal de excitação a própria música que está sendo executada (desde que esteja sendo reproduzida eletronicamente). A obtenção da IR é praticamente igual à do método anterior, baseando-se em comparar o espectro do sinal antes de ser enviado ao ambiente com um sinal capturado na sala em questão. Divide-se o espectro (deconvolução no domínio do tempo) do sinal capturado pelo espectro do sinal enviado.

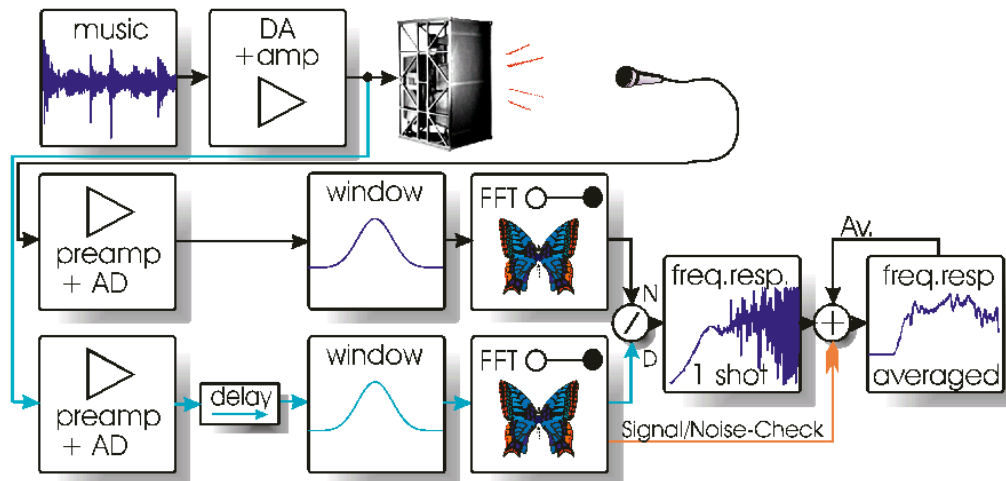


Figura 4: Obtenção da resposta em frequência com excitação qualquer (ver [5])

O uso de música como sinal de excitação não é recomendável, devido ao comportamento espectral inconsistente, bastante rugoso. Para este tipo de sinal é necessário considerar um longo período de tempo para a obtenção do espectro, e ainda assim é necessário realizar uma média com diversas realizações de medida, para obter-se um resultado consistente.

### 1.1.6 Varredura Logarítmica

Na análise por FFT, qualquer tipo de sinal de excitação pode ser usado. Recomenda-se então usar sinais de excitação que apresentem comportamento espectral favorável para medições, em especial ruído ou varredura.

Atualmente, existe a tendência de usar-se varreduras logarítmicas como sinal de excitação, por apresentarem boa distribuição da energia em seu espectro – possuem um espectro rosa – para aplicações acústicas [5] e serem bastante robusta a não-linearidades.

Quando uma MLS é usada como sinal de excitação, não-linearidades do sistema podem ser notadas na IR como rugosidades no sinal, repetições do sinal deslocadas no tempo e com menor amplitude. Quando a varredura logarítmica é usada como sinal de excitação, é possível isolar completamente a resposta impulsiva desejada das componentes presentes no sinal devido à não-linearidades. Isto é possível porque as harmônicas geradas por não-linearidades do sistema, após a deconvolução, aparecem em tempos negativos da IR.

A obtenção da IR dá-se da seguinte maneira:

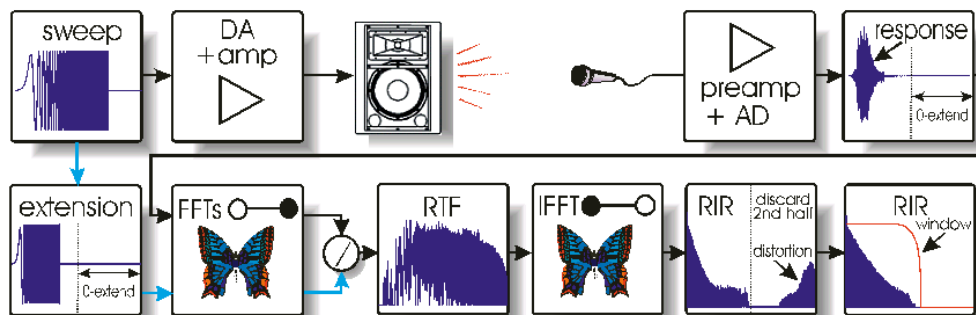


Figura 5: Deconvolução linear para a obtenção da resposta impulsiva por meio de varredura logarítmica (ver [5])

### 1.1.7 Gravador de Intensidade

Apenas como curiosidade, um dos primeiros métodos para medir a função de transferência de uma sala era usando-se um equipamento que gerava uma varredura logarítmica de senoide de forma analógica, e apenas retificava o sinal adquirido, desenhando a envoltória desse sinal numa folha de papel com escala logarítmica. Este método é bastante semelhante ao método TDS e poderia ser implementado nos dias de hoje de uma forma digital. A sua grande desvantagem é que por não fornecer informação da fase da função de transferência, ele não permite a obtenção da IR.

### 1.2 Correção Espectral

Praticamente todos os métodos apresentados na seção anterior podem ser realizados de forma digital, com o uso de um computador e uma placa de áudio. Estes equipamentos possuem respostas em frequência características, que alteram o espectro do sinal obtido. É possível reduzir a influência destes equipamentos na medição calculando-se a resposta em frequência destes aparelhos. Para tanto, basta realizar a medição da IR por qualquer método com a saída da placa de áudio ligada diretamente na sua entrada. Este será o espectro de referência do sistema.

Também é possível excluir o efeito da função de transferência do alto-falante fechando o circuito acústico. Isto é feito aplicando-se uma janela na IR de forma a excluir a influência da sala na medição. Por FFT, é possível obter a função de transferência do alto-falante, e também deconvolui-la do sinal. Para medição de tempo de reverberação e demais parâmetros da acústica de salas, a coloração do espectro pelo alto-falante não apresentará um grande problema, desde que a função de transferência do mesmo seja aproximadamente linear. Já para medições com o propósito de auralização, a coloração do alto-falante torna-se extremamente indesejável.

### 1.3 Processamento da IR para análise acústica de salas

Respostas impulsivas reais diferem em basicamente três aspectos das respostas impulsivas teóricamente esperadas:

1. Uma IR real apresenta um atraso antes da chegada do som direto, devido à velocidade de propagação do som.
2. decaimento pode conter várias partes com diferentes taxas de decaimento, ou nem mesmo ser exponencial.
3. A IR possui ruído de fundo, o que limita o decaimento a um certo patamar.

#### 1.3.1 Determinação do início do sinal

Causado por atrasos de propagação do sistema, principalmente devido ao tempo que o som leva para se propagar do alto-falante ao microfone.

A norma ISO 3382 fornece a seguinte recomendação: “Determina-se o início do som direto a partir da IR de banda larga, como o ponto onde o sinal é 20dB menor que valor máximo da IR, mas significativamente maior que o ruído de fundo”.

#### 1.3.2 Determinação do ponto de cruzamento entre decaimento e ruído

A subestimação do efeito do ruído pode causar um erro sistemático na obtenção dos parâmetros acústicos. A norma ISO 3382 propõe que o limite de integração superior da curva de decaimento seja tomado num ponto 10dB acima do ponto de cruzamento entre a assíntota de decaimento da IR e o nível de ruído. Desta forma, minimiza-se a energia de ruído presente na curva de decaimento.

A determinação do ponto de cruzamento tem um efeito considerável na curva de decaimento. Se o ponto de truncamento escolhido estiver muito antes do ponto de cruzamento, o tempo de decaimento será subestimado, e vice-versa.

#### 1.3.3 Minimização da influência do ruído

Existem alguns métodos para minimizar a influência do ruído no cálculo da curva de decaimento, entre eles o método de Chu e o método de Hirata. O método de Lundeby também propõe-se a minimizar o ruído, mas também minimizando o efeito do truncamento.

**Método de Chu:** Para a minimização da interferência do ruído na obtenção da curva de decaimento, Chu [8] propôs subtrair-se da curva de energia da IR a estimativa do valor eficaz (RMS) do ruído, e posteriormente realizar-se a integração reversa de Schroeder.

Se o ruído for estacionário e a estimativa do nível do ruído for boa, o resultado da integral reversa de Schroeder fica bastante próximo da curva de decaimento ideal.

**Método de Hirata:** Hirata [9] propôs outro método simples para melhorar a SNR da curva de decaimento, substituindo a IR elevada ao quadrado pelo produto de duas IR medidas separadamente na mesma posição.

$$\begin{aligned} \int_t^\infty p^2(t)dt &\Rightarrow \int_t^\infty [p_1(t) + n_1(t)][p_2(t) + n_2(t)]dt = \\ \int_t^\infty [p_1(t)p_2(t) + p_1(t)n_2(t) + p_2(t)n_1(t) + n_2(t)n_1(t)]dt &= \\ \int_t^\infty [p_1(t)p_2(t)]dt + K(t) &\approx \int_t^\infty p^2(t)dt + K(t) \end{aligned} \quad (3.3 - 2)$$

As medidas consistem das respostas  $p_1$  e  $p_2$  e seus respectivos ruídos  $n_1$  e  $n_2$ . Como  $p_1$  e  $p_2$  são altamente correlacionados, eles fornecem valores positivos equivalentes à  $p^2$ . Se o ruído afetando estas medidas for **não-correlacionado**, ele será visto como uma variação aleatória  $K$  superposta ao primeiro termo, fornecendo um resultado para a integral reversa de Schroeder bastante próximo da curva de decaimento ideal.

**Método de Lundeby:** Lundeby [10] propôs um algoritmo para determinação automática do nível de ruído de fundo, do ponto de truncamento e a taxa de decaimento da IR. Os passos do algoritmo são:

1. Toma-se a média da curva da IR elevada ao quadrado em intervalos de 10 a 50ms, o que fornece uma curva suavizada para o uso da regressão linear.
2. Faz-se uma primeira estimativa do ruído de fundo usando um segmento que contenha os últimos 10% da IR.
3. A taxa de decaimento da IR é estimada por regressão linear das médias locais entre o pico e o primeiro intervalo 5dB a 10dB acima do valor estimado para o ruído de fundo.
4. Estabelece-se um ponto preliminar de cruzamento na intersecção da assíntota do decaimento e do nível de ruído.
5. Determina-se um novo intervalo para realização das médias. Este intervalo é calculado de forma a obter-se de 3 a 10 intervalos a cada 10dB de decaimento.
6. Obtêm-se as médias da IR elevada ao quadrado nestes novos intervalos.
7. Determina-se um novo valor para o nível de ruído de fundo. O novo segmento a ser avaliado deve iniciar num ponto que corresponda a um decaimento de 5dB a 10dB após o ponto de cruzamento, ou um mínimo de 10% do tamanho total da IR.
8. Encontra-se um novo ponto de cruzamento entre o nível de ruído e a assíntota do decaimento.

Repetem-se os passo de 5 a 8 até o ponto de cruzamento convergir ou atingir-se o número máximo de iterações.

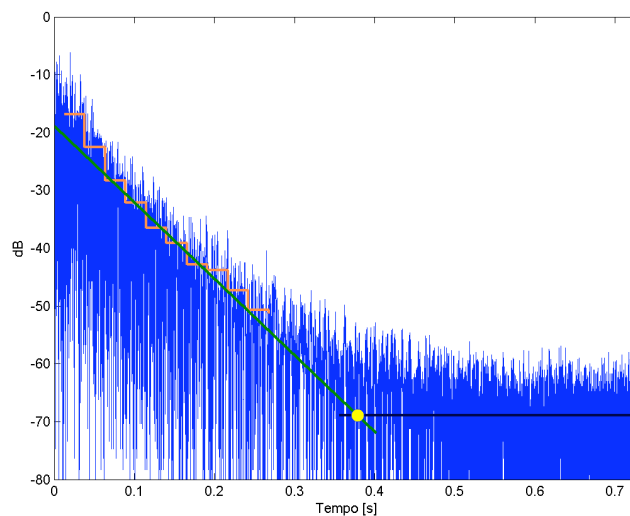


Figura 6: O método de Lundeby

## 1.4 Comparação entre Sinais de Excitação

O fator de crista (do inglês, *Crest Factor*) é definido como uma razão entre a tensão de pico e a tensão RMS de um sinal, geralmente expresso em dB. Sinais com fator de crista elevado devem ser evitados, uma vez que estes sinais apresentam picos elevados, que podem causar distorção do sinal.

Em primeira instância, um sinal MLS bipolar seria o sinal ideal no sentido de se extrair o máximo de energia de uma medição, já que apresenta um  $FC=0\text{dB}$ . Mas, o fator de crista das MLS's usadas na prática é sensivelmente maior que  $0\text{dB}$ . Na placa de áudio, após o conversor D/A, o sinal passa por um filtro "anti-aliasing", que acaba por alterar a forma de onda da MLS. Verifica-se então a presença de picos no sinal de saída, o que degrada o fator de crista do sinal. Para evitar que estes picos sejam saturados, o sinal MLS deve ser enviado ao conversor D/A com nível entre  $8\text{dB}$  e  $5\text{dB}$  menor que o nível máximo do conversor. A figura 1.4-6 mostra as amostras iniciais de uma MLS após passar por um filtro "anti-aliasing". Verifica-se claramente a deformação do sinal e a presença de picos bastante pronunciados. Este sinal, que é o sinal efetivamente usado para a excitação de salas apresenta  $FC=8.5\text{dB}$ , valor consideravelmente maior que os teóricos  $0\text{dB}$  da MLS.

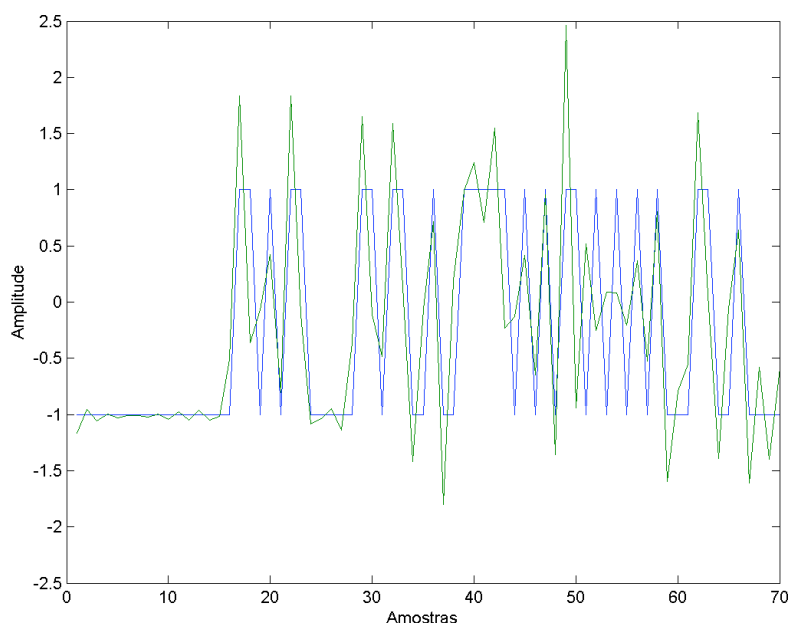


Figura 6: Sinal MLS original (azul) e o mesmo sinal após passar por um filtro "anti-aliasing" (verde)

A varredura de senóide apresenta um FC teórico de  $3\text{dB}$ . Por este sinal conter energia apenas nas frequências de interesse, ele não será afetado pelos filtros da placa de áudio, e poderá na prática ser reproduzido com uma intensidade maior que uma MLS. Uma varredura utilizada para a excitação de salas (após passar pelo filtro "anti-aliasing") apresentava  $FC=3.6\text{dB}$ , valor bastante próximo do FC teórico.

Deve-se atentar que mesmo que o sinal seja reproduzido sem distorções pela placa de áudio, os alto-falantes geralmente possuem respostas não lineares, que tornam-se críticas para intensidade sonoras elevadas. Assim, mesmo com FC favorável, não é recomendável reproduzir sinais de excitação – seja MLS ou varredura – com volume muito elevado.

## 1.5 Comparação entre Métodos de Medida

Entre os métodos apresentados neste texto, aqueles baseados nos sinais de excitação MLS e varredura são os mais comumente usados, em razão das propriedades destes sinais apresentadas nas seções anteriores.

Ao excitar-se a sala com um impulso (1.1.1), pouca energia será fornecida à sala em teste, resultando numa SNR bastante desfavorável. Na tentativa de melhorar a SNR elevando a intensidade de reprodução do sinal, deve-se tomar cuidado para que o alto-falante não passe a trabalhar numa região de elevada não-linearidade. A realização de média temporal de várias excitações pode fornecer uma melhora considerável no SNR se o ruído presente no sinal for não-correlacionado. Neste caso, é necessário garantir que o período de repetição dos impulsos seja maior que o tempo de reverberação da sala a ser medida para evitar "aliasing". Na verdade, esta precaução deve ser



tomada com qualquer método de medida periódico, por exemplo o MLS, o que requer uma estimativa prévia da ordem do tempo de decaimento do sistema sendo medido.

O uso de senóides (1.1.2) oferece uma função de transferência bastante precisa para as frequências excitadas, mas de baixa resolução. Para obter-se uma resolução aceitável, este método tornaria-se excessivamente demorado.

O método TDS possui uma realização interessante, mas a construção de um filtro passa-faixa de frequência central variante no tempo é de difícil realização em software. Especialistas consideram este método obsoleto. Da mesma forma, as vantagens apresentadas pelo método MLS se tornaram obsoletas com o aumento da velocidade de processamento e capacidade de memória dos computadores atuais.

O uso da FFT (1.1.4) é provavelmente o método mais interessante nos dias de hoje. Sendo assim, cabe apenas selecionar o sinal de excitação mais adequado, ou seja, aquele que oferece a melhor SNR. De acordo com a teoria do fator de crista, os melhores sinais para esta aplicação seriam a varredura logarítmica e a MLS. Verificou-se que o método de excitação por varredura logarítmica com deconvolução via FFT – sugiro o nome “*Log-sweep FFT method*” (LSF) – mostra-se o método mais indicado para medição acústica de salas nos dias de hoje.

## 2. SISTEMA DE MEDIÇÃO

A arquitetura de um sistema de medição acústica, é geralmente constituída por dois módulos, como apresentado na figura 2-1. O primeiro módulo, responsável pela geração do sinal, obtenção da IR e cálculo dos parâmetros acústicos, é implementado por um microcomputador. O segundo módulo, responsável pela reprodução e aquisição de sinais sonoros, é implementado por uma placa de áudio e um conjunto de transdutores. Nestas etapas, pode-se dizer que o sinal pertence a um de três domínios distintos: o sinal acústico analógico, o sinal elétrico analógico e o sinal elétrico digital.

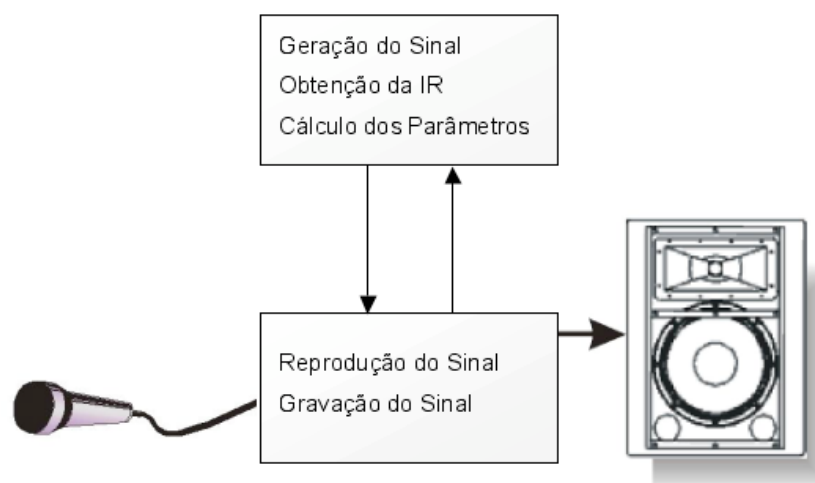


Figura 7: Diagrama de blocos de um sistema de medição acústica

### 2.1 Reprodução e Aquisição de Áudio

Uma placa de áudio de boa qualidade é um requisito chave para a qualidade de reprodução e gravação dos sinais. Os requisitos básicos para que uma placa de áudio possa ser usada para medição acústica são:

1. apresentar linearidade e boa SNR;
2. trabalhar com taxas de amostragem superiores a 40kHz;
3. funcionar em modo “stereo full duplex” (produzir um sinal estéreo e gravar outro sinal estéreo simultaneamente).

Como transdutor de entrada recomenda-se usar um microfone de medição com resposta praticamente plana e omnidirecional. O mesmo vale para o transdutor de saída.

A IR de uma sala obtida por meio destes equipamentos contém não só a resposta da sala, mas também a resposta de todos os elementos deste sistema. Para obter uma medição o mais fiel possível, é necessário que os elementos deste sistema possuam função de transferência o mais

linear possível. Como esses elementos estão todos ligados em série, a qualidade do sistema é limitada pela resposta do elemento de qualidade mais baixa.

Caso o sinal esteja sendo reproduzido por uma fonte externa, como um CD-player, e sendo apenas gravado pela placa de áudio, é necessário atentar para o sincronismo entre estes dois equipamentos. Mesmo uma diferença mínima entre as frequências de amostragem acarreta uma diferença no número de amostras, o que para sinais como o MLS é inaceitável.

### 2.2 Geração e Tratamento do Sinal

A geração e, principalmente, o tratamento dos sinais usados para as medições acústicas, requer uma elevada taxa computacional. Portanto é recomendável o uso de um bom computador para acelerar a realização desses cálculos. Também, como se trata de arquivos de áudio não comprimidos, é necessária disponibilidade de memória física e memória RAM. Estes requisitos são facilmente atingidos pelos microcomputadores disponíveis atualmente no mercado.

#### 2.2.1 Geração do Sinal

O primeiro passo para a realização da medição é a criação de um sinal de excitação para a sala. Os sinais recomendados para medição acústica são impulsos, varreduras e seqüências MLS.

Tanto varreduras senoidais quanto seqüências MLS podem ser geradas por algoritmos relativamente simples. As varreduras lineares ou logarítmicas são geralmente gerados no domínio do tempo, mas pode também ser gerada no domínio da frequência, como explicado em [5]. Para as seqüências MLS, além da seqüência MLS propriamente dita, a função deve também retornar os vetores de permutação de linha e coluna necessários para o uso da FHT, conforme especificado por Chu [10] e Cohn & Lempel [11].

Impulsos são gerados diretamente, criando um vetor nulo com apenas uma amostra de valor 1. Como já foi comentado, este sinal oferece uma SNR reduzida, mas ele é interessante para comparação do espectro de referência do sistema de medição. Se a IR obtida para qualquer um dos dois sinais anteriores for muito diferente da IR obtida pelo impulso, então o sistema pode conter algum tipo de não linearidade.

O sinal gerado de forma digital deve ser gravado num formato adequado para sua reprodução.

#### 2.2.2 Recepção do Sinal

A placa de áudio e o sistema operacional do PC devem permitir a reprodução e aquisição simultânea de som. Um arquivo estéreo com a resposta da sala ao sinal de excitação em um canal e o sinal de referência (curto elétrico) no outro canal deve ser gerado. O sinal de referência é importante para a correção espectral (seção 1.2).

Na fase de aquisição do sinal, é importante que o aplicativo de aquisição avise caso ocorra saturação do sinal, ou seja, quando o nível do sinal está acima do nível máximo de amostragem do conversor A/D.

#### 2.2.3 Deconvolução

De posse da resposta da sala ao sinal de excitação, é necessário deconvoluir o sinal, de forma a obter-se a IR.

As MLS devem ser deconvoluídas através da FHT. Conforme Peltonen [9], para a obtenção da IR via FHT, primeiro é necessário reordenar a seqüência de acordo com o vetor de permutação de coluna e depois adicionar uma nova amostra de valor nulo no início da seqüência, de forma que ela fique com comprimento  $2^N$  (a FHT funciona apenas para seqüências de comprimento  $2^N$ ). Após o cálculo da FHT, descarta-se o primeiro elemento da seqüência. Então a seqüência é novamente reordenada, agora de acordo com o vetor de permutação de linhas, fornecendo assim a IR da sala.

Para a deconvolução via SLF, usá-se uma função FFT. Primeiramente obtém-se o espectro do sinal de excitação e do sinal de resposta. O espectro do sinal de resposta é então dividido pelo espectro do sinal de excitação, o que fornece a função de transferência da sala. A IR é obtida por meio da transformada inversa de Fourier (IFFT) da função de transferência. Este método para a obtenção da IR é bastante suscetível ao ruído. Existem diversos métodos de estimação espectral que tentam tornar esta operação mais confiável, mas que não foram tratados neste projeto.

Neste ponto, é possível realizar a compensação espectral mencionada na seção 1.2, dividindo-se a função de transferência obtida por um espectro de referência.

## 2.2.4 Tratamento da IR

Os parâmetros acústicos são usualmente calculados por faixas de frequência. Deve-se então filtrar a IR de banda larga por um banco de filtros de oitava ou terço-de-oitava.

Após a filtragem, ainda é necessário um tratamento da IR antes de se calcular os parâmetros acústicos. Este tratamento do sinal visa compensar os efeitos mencionados na seção 1.3 (atraso na chegada do sinal, decaimento possivelmente não exponencial e ruído de fundo). Foram desenvolvidas funções que implementam o método de Chu, o método de Hirata e o método de Lundeby (seção 1.3.3).

## 2.2.5 Cálculo dos Parâmetros Acústicos

Uma vez que o sinal já foi tratado, e já está filtrado na banda de interesse, resta então calcular os parâmetros acústicos detalhados na norma ISO 3382, entre eles: Tempo de Decaimento, Força Sonora, Clareza, Definição e Tempo Central.

## 3. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer aos membros do grupo de pesquisa AcMus, especialmente ao mestrando Fábio Leão e aos Profs. Drs. Fábio Kon, Marcelo Gomes de Queiroz e Flávio S. Correa da Silva. Agradecemos também ao Prof. Dr. Luiz Baccalá (PTC – EPU SP) pela grande ajuda no decorrer da pesquisa e ao Dr. Swen Müller (Inmetro) por ceder alguma das figuras utilizadas neste texto. Esta pesquisa tem apoio da FAPESP, proc. n.o 02/02678-0.

## 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vorländer M., Bietz H. 1994. Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time. *Acustica* Vol. **80**. pp. 205–215.
- [2] ISO 3382:1997. Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [3] Burt, Phillip M. S. "Measuring Acoustic Responses with Maximum-Length Sequences". In *ITS Proceedings*, pp 284-289. Agosto 1998.
- [4] Heyser R. C. 1988. An anthology of the works of Richard C. Heyser on measurement, analysis and perception. AES Inc., New York 1988. 279p.
- [5] Müller, S., Massarani P., "Transfer Function Measurements with Sweeps". *J.AES*, Vol. 49, number 6, pp.443. 2001.
- [6] Vanderkooy, John. "Another Approach to Time Delay Spectrometry". *J.AES*, vol. 34, July 1986, pp.523-538.
- [7] Greiner, Richard; Wania, Jamsheed; Noejovich, Gerardo. "A Digital Approach to Time Delay Spectrometry". *J.AES*, vol.37, July 1989, pp593-602.
- [8] 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.
- [9] Hirata Y. "A Method of Eliminating Noise in Power Responses" *J. Sound Vib.* vol. **82** pp. 593–595. 1982.
- [10] Lundeby A., Vigran T.E., Bietz H., Vorländer M. 1995. Uncertainties of Measurements in Room Acoustics. *Acustica* Vol. **81** (1995). pp. 344–355.
- [11] Cohn, M. & Lempel, A. "On Fast M-Sequence Transforms". *IEEE Trans. Inf. Theory* IT-23 (1977) 135-137.

# IMPACTO AMBIENTAL E OCUPACIONAL: O RUÍDO COMO UM PROBLEMA DE SAÚDE PÚBLICA

**Ana Claudia Fiorini**  
DERDIC-PUC-SP  
e-mail: [acfiorini@pucsp.br](mailto:acfiorini@pucsp.br)

Resumo: O ruído é hoje a terceira principal causa de poluição no Mundo, perdendo apenas para o ar e a água. Em 1980, a Organização Mundial de Saúde reconheceu que o ruído pode perturbar o trabalho, o descanso, o sono e a comunicação nos seres humanos, pode prejudicar a audição e causar ou provocar reações psicológicas, fisiológicas e talvez até patológicas.

Não é possível imaginar que exista na sociedade urbana dos nossos dias, especialmente nas grandes cidades, pessoa não exposta a ruído. Deve-se considerar que há maior ou menor exposição a esse agente físico, presente de forma contínua ou intermitente, em nosso cotidiano. É comum no Brasil constatar-se que praticamente em todas as atividades de lazer, independente da classe social, há exposição a níveis de pressão sonora elevados, seja de forma intermitente ou contínua. Tomemos como exemplo os shows, o ruído em bares, restaurantes, danceterias, bailes, festas populares, cultos religiosos, academias de ginástica e outros.

Tanto o ruído ocupacional como o urbano (proveniente principalmente de veículos de transporte) e o das atividades de lazer (academias de ginástica, academias de tiros, brinquedos, etc.), indicam a necessidade emergente de criação de programas de educação ambiental no país, para prevenir os efeitos desta exposição não só em trabalhadores mas na população em geral.

# TÉCNICAS DE MEDIÇÃO EM ACÚSTICA DE SALAS

**Nicolas Isnard**

01dB

nicolas.isnard@01db.com.br

Resumo: Neste trabalho forneceremos as bases práticas das técnicas modernas de medições acústicas de salas e auditórios (isolamentos, Tempo de Reverberação, Intelligibilidade, etc.) e introdução ao uso de cabeças artificiais e critérios psicoacústicos. Serão abordados os seguintes temas: 1 - *Introdução / Teoria*: - Definições das grandezas físicas pertinentes; - Ferramentas necessárias para os testes; - Qual análise deve ser usada para qual tipo de problema (critérios de salas, RASTI, Tempo de reverberação). 2 - *O uso da técnica MLS para medições de tempo de reverberação e de RASTI*: - Através de um caso prático, serão apresentadas as técnicas MLS e RASTI (intelligibilidade); 3- *Introdução a psicoacústica aplicada*: Porque usar uma cabeça artificial?; - Critérios pertinentes a acústica de salas.