



## **METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE LIMIAR DIFERENCIAL DE REVERBERAÇÃO ÓTIMA PARA PERFORMANCE MUSICAL**

**Marcela Álvares Maciel**

ISOBRASIL LTDA, Rua Domingos Monteiro, 333. Jardim Industrial. Contagem, MG.

CEP 32215-380 Telefone +55 (31) 3368-6625 Fax +55 (31) 3368-6621

e-mail: [marcela@isobrasil.com.br](mailto:marcela@isobrasil.com.br)

### **RESUMO**

No presente trabalho é apresentada uma investigação acerca do limiar diferencial (LD) para tempo de reverberação ótimo (TRo), destacando-se a definição de uma nova abordagem de medição deste parâmetro, tendo em vista as limitações dos experimentos psicoacústicos realizados em salas protótipo, que apresentam erros de medição da ordem de grandeza do próprio limiar. Assim, propõe-se a utilização de técnicas de processamento digital de sinais associado a experimentos realizados em laboratórios com estímulos pré-definidos, que permitem um maior controle e manipulação de variáveis e erros que estão constantemente envolvidos neste tipo de experimento. O Auditório da Escola de Música da UFMG é utilizado como estudo de caso para a validação dos sinais acústicos obtidos a partir da adoção de filtros artificiais de reverberação, bem como para definição de algumas variáveis.

### **ABSTRACT**

This paper presents an study concerning the difference limen (DL) for optimum reverberation time (RTo). A new method of measurement of this parameter is proposed. Techniques of digital signal processing is used. This provides a better control and manipulation of variable and errors that are constantly involved in this kind of experiment. For the validation of the acoustic signals resulted from the implementation of artificial reverberation filters, the Auditorium of the School of Music of the UFMG is used as study of case.

### **1. INTRODUÇÃO**

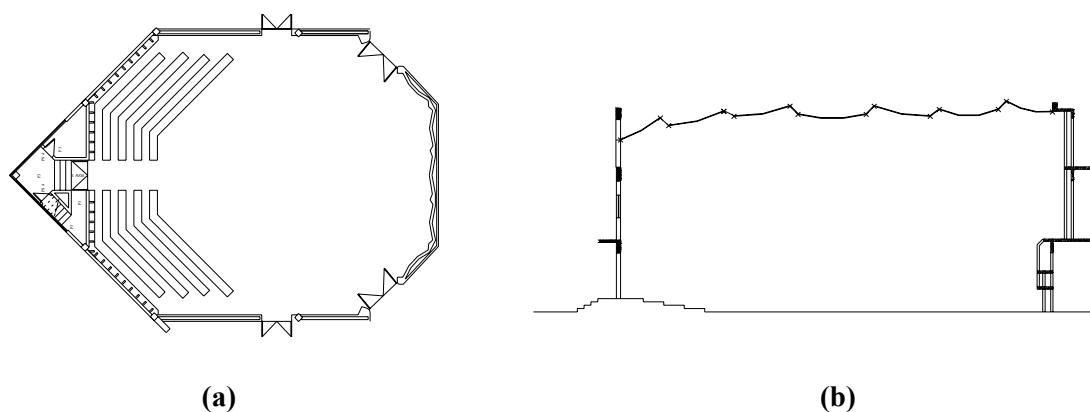
O termo limiar foi introduzido por Herbart, em 1824, através do conceito de limiar de consciência, que consiste na fronteira que uma idéia parece atravessar quando passa de um estado totalmente inibido a um certo grau de idealização. Mas, sem dúvida, foi Fechner quem, em 1860, deu ao termo o sentido sensorial com que se há utilizado-o desde então, i.e, o ponto em que um estímulo ou uma diferença começa a ser perceptível ou desaparece. Muitos estudos experimentais destinados a determinar com exatidão o valor de limiares subjetivos, realizados desde então, manifestaram a impossibilidade de encontrar um valor de estimulação em que os estímulos fossem sempre perceptíveis. Isto levou a proposição, ainda hoje aceita, de uma definição operativa do limiar como a pequena quantidade de estímulo que é percebido cinquenta por cento das vezes.

A realização de experimentos em salas protótipos para medição de limiar diferencial de tempo de reverberação, tal como aqueles realizados por Seraphim (1958) apud Maciel (2003) fazem-se ideais do ponto de vista de estar se utilizando um filtro natural de reverberação. Neste tipo de experimento, os testes psicoacústicos de comparação aos pares são realizados com o sujeito na própria sala de testes, de maneira que os sinais de teste com diferentes tempos de reverberação são obtidos a partir das

alterações das propriedades de absorção sonora das superfícies do recinto. Entretanto, a alteração manual da absorção da sala que trazem um dos grandes erros do experimento, na medida em que os intervalos de tempos entre dois estímulos são demasiadamente grandes.

Dentre os vários problemas que este tipo de experimento em salas protótipo traz consigo, destacam-se ainda como erros de hábito e expectativa. No caso específico da medição do limiar diferencial para tempo de reverberação, é válido lembrar que a variação do tempo de reverberação de um recinto implica também na alteração de outros atributos acústicos, tais como a claridade, definição e razão de baixo, tornando assim o controle de variáveis neste tipo de experimento bastante complexo.

Neste trabalho apresenta-se a alternativa da realização dos testes psicoacústicos utilizando-se de técnicas de processamento digital de sinais. Acrescenta-se a isso ainda a possibilidade da realização dos testes em laboratórios, a partir de interfaces computadorizadas, que permitem um maior controle de variáveis experimentais. Assim, pretende-se a minimização de erros comuns neste tipo de experimento, tal como o intervalo temporal entre os dois estímulos. Acrescenta-se a isso ainda a possibilidade de um maior controle de vários parâmetros que interferem diretamente nos resultados. Para tanto, utiliza-se do auditório da Escola de Música da UFMG (FIG 01) como referência na determinação de alguns parâmetros, bem como na validação dos sinais acústicos obtidos a partir da adoção de filtros artificiais de reverberação.



**Figura 01 – Auditório da Escola de Música da UFMG. Em (a), planta. Em (b), corte.**

## 2. TEORIA DO LIMIAR SENSORIAL

A teoria do limiar sensorial postula a necessidade de um nível mínimo da intensidade da estimulação, abaixo da qual esta não suscita sensação subjetiva alguma. Se nossos sentidos são como janelas para o mundo exterior, o limiar sensorial representaria a altura a que se encontra o peitoril: tudo o que ocorra por debaixo deste nível nos resultará inacessível. Assim, emerge a proposição de dois tipos de limiares: o limiar absoluto e o limiar diferencial.

### 2.1 Limiar Absoluto

Para que um determinado estímulo seja captado pelo sistema sensorial correspondente é imprescindível que alcance em certo nível mínimo. A este nível se chama limiar absoluto. Os estímulos físicos de intensidade inferior suscitam um nível de sensação nulo. É importante destacar, nesse sentido, que a sensibilidade ( $s$ ) é o inverso do limiar ( $x_0$ ): um limiar alto corresponde a uma sensibilidade baixa e vice-versa. A relação entre ambas as magnitudes é

$$s = \frac{1}{x_0} \quad [\text{Eq. 01}]$$

## 2.2 Limiar Diferencial

Nossos sentidos também apresentam um comportamento relativo com os estímulos de intensidades superior ao limiar absoluto. Assim, manifesta importantes limitações a hora de detectar as variações de intensidade de um estímulo.

A percepção da diferença entre dois estímulos é preciso que a diferença ultrapasse um certo nível, em caso contrário, os estímulos fisicamente distintos, nos parecerá o mesmo. Assim, a mínima diferença que se requer para que a diferença resulte perceptível recebe o nome de limiar diferencial,  $\Delta x$ . O limiar diferencial é uma magnitude física que está associada a um estímulo e que será expresso nas mesmas unidades em que se começa o estímulo. Há que se distinguir os limiares diferenciais: superiores e inferiores. O primeiro é o mínimo aumento perceptível e o segundo o mínimo decréscimo perceptível. Com frequência, são diferentes, e então o limiar diferencial se define como um valor intermediário a ambos.

## 2.3 Limiar Diferencial e Intensidade do estímulo: funções de Weber

A experiência cotidiana é pródiga em exemplos que põem de manifesto a dependência do limiar diferencial com respeito a intensidade do estímulo. Assim, se questiona sobre a natureza da relação entre a intensidade do estímulo e a amplitude do limiar diferencial correspondente. Toda função que especifique como é essa relação receberá o nome de função de Weber

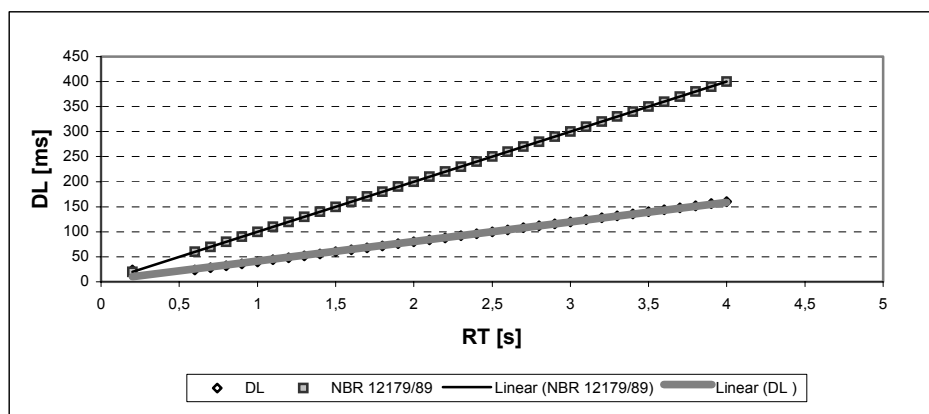
$$\frac{\Delta x}{x} = k \quad [\text{Eq. 02}]$$

Uma função de Weber constitui, assim, o modelo teórico do comportamento dos limiares diferenciais. A lei de Weber, entretanto, apresenta discrepâncias em níveis de estimulação muito baixo ou muito altos.

## 2.4 Limiar diferencial para tempo de reverberação ótimo

O conhecimento da diferença apenas perceptível (dap) é de importância crucial no estudo de adequação acústica de espaços para performance musical. Seraphim (1958) apud Maciel (2003) foi o primeiro a conduzir investigações detalhadas para determinação do limiar diferencial para TR. Para a região do TR entre 0,6 s e 4,0 s o valor relativo do LD é cerca de 4%. Já para TR menor do 0,6 s, o LD aumenta até o valor de 12% para TR igual a 0,2s. Estes resultados vêm contrariar a proposição de Fechner de que as diferenças apenas perceptíveis eram constantes e confirmam o modelo idealizado por Ekman, de que o limiar diferencial cresce com o aumento da intensidade do estímulo. (MACIEL, 2003). A FIG 2 apresenta a relação entre tempo de reverberação, em segundos, e limiar diferencial para tempo de reverberação, em milisegundos, em que se observa claramente uma relação linear entre os dois parâmetros físicos, a saber LD e TR.

A NBR 12179/89 admite um erro de até 10% sobre o valor ótimo para o tempo de reverberação. Pela FIG 2, observa-se que este valor é próximo ao limiar diferencial para tempos de reverberação curtos. Entretanto, a medida em que os tempos de reverberação ficam mais longos, o erro admissível pela referida norma distancia consideravelmente do limiar diferencial, o que significa uma grande permissividade em termos de adequação dos tempos de reverberação, podendo comprometer a qualidade dos espaços projetados para performance musical, no que diz respeito ao atributo da reverberância.



**Figura 2 - Comparação entre erro permitido pela NBR 12179/89 para adequação dos valores ótimos para tempo de reverberação e os limiares diferenciais para tempo de reverberação.**

### 3. METODOLOGIA DO EXPERIMENTO PSICOACÚSTICO

#### 3.1 Método Psicométrico

Segundo Zwicker (1998), o resultado da medição da diferença apenas perceptível depende da técnica de medida utilizada. Assim, dentre os métodos psicométricos existentes, optou-se pelo método dos estímulos constantes, também conhecido como método de comparação ao pares. A denominação do procedimento como método dos estímulos constantes pode ser explicada em função da intensidade dos estímulos utilizados serem prefixados de antemão e não se modificarem durante o experimento. A determinação de tal método foi baseada na maior praticidade de exequibilidade dos testes e entendimento mais fácil do procedimento por parte dos sujeitos, além deste tipo de procedimento implicar em resultados com um alto grau de completude, já que os sujeitos julgam todas as possibilidades de combinação dos estímulos em pares.

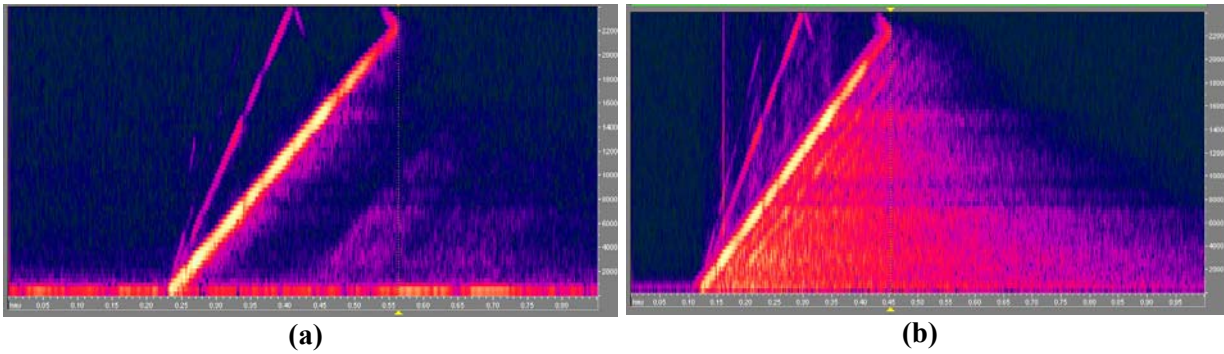
#### 3.2 Elaboração dos Estímulos

Uma sala de concertos apresenta-se como um sistema linear, descrita por funções de transferência impulsivas. De forma geral, a resposta impulsiva da sala,  $p(t)$ , é determinada pela integral de convolução (Equação 03), onde  $po(t)$  é o sinal de entrada (o impulso sonoro gerado dentro da sala);  $h(t)$  é a função de transferência da sala (sua resposta a  $\delta$  função impulsiva);  $\tau$  é a variável de integração.

$$p(t) = po(t)h(t) = \int_0^{\infty} po(\tau)h(1-\tau)d\tau \quad [\text{Eq. 03}]$$

Fala humana ou música pode também ser considerados como sinais de entrada na Equação 03. Se a resposta impulsiva da sala é conhecida, então pela execução da operação descrita, utilizando um computador, nós podemos obter o sinal de saída, podendo inclusive, escutá-lo.

Partindo-se desses princípios, o material dos testes deve constituir-se basicamente de sons complexos secos, ou seja, sem reverberação. Para tanto, existem pelo menos duas alternativas, dentre elas as gravações do sinal de teste em câmara anecóica. Outra possibilidade é a utilização de sons complexos sintetizados por computador sem a adoção, a princípio, de filtros de reverberação (FIG 3). Ambas alternativas prestam-se a minimizar a interferência de possíveis efeitos de reverberação do ambiente no sinal de teste. Na Figura 3b, temos resultado de gravação do sinal de teste no Auditório da Escola de Música da UFMG, em que se observam as mudanças espectrais no sinal acústico, proporcionadas pelo filtro natural do ambiente.



**Figura 3 – Espectrogramas. Em (a), sinal de teste sintetizado, sem filtros de reverberação. Em (b), sinal de teste gravado no auditório da Escola de Música.**

A introdução de efeitos de reverberação nos sinais de teste, de maneira a obter-se sinais complexos com diferentes tempos de reverberação, pode ser proporcionada artificialmente a partir da simulação em programas computacionais de processamento digital de sinais, que propiciam o controle numérico do tempo de reverberação. Isso se constitui como uma vantagem em relação à realização de experimentos em salas protótipo, com filtros naturais de reverberação, já que apresentam um controle da magnitude do estímulo muito mais complexa.

As funções básicas dos algoritmos de simulação de reverberação existentes são os filtros. Considerando-se todas as variáveis como vetores contendo os sinais e os coeficientes do numerador e denominador, estas funções, como o próprio nome diz, são utilizadas para filtrar um sinal de entrada (*signal\_in*), com a função de transferência de um filtro  $H(z)$  descrita pelo numerador (*num*) e pelo denominador (*den*), obtendo o sinal de saída desejado (*signal\_out*). A sintaxe dessa função no programa MATLAB é bastante simples, podendo ser escrita como:

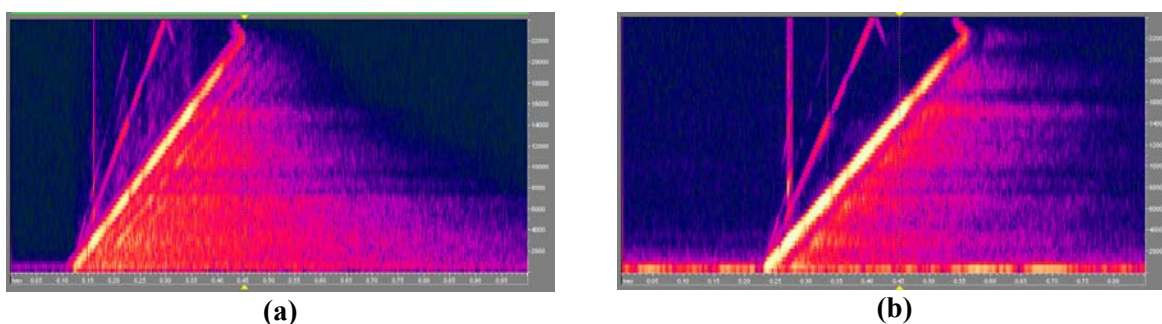
$$signal\_out = filter(num, den, signal\_in) \quad [Eq. 04]$$

Desde o primeiro trabalho de Schroeder, realizado na década de 60, sobre reverberadores artificiais baseados em processamento de sinais em tempo discreto, muitas implementações tem sido apresentadas em diferentes publicações. Acrescenta-se a isso ainda os filtros de reverberação artificial, existentes em programas comerciais de edição de som. Assim, dada a utilização de filtros artificiais de reverberação, é imprescindível neste tipo de experimento a validação do filtro artificial adotado, haja vista a existência de várias alternativas de filtros de reverberação artificial atualmente existentes no mercado. A validação do filtro de reverberação artificial adotado pode ser feita mediante testes psicoacústicos de comparação aos pares. Para tanto, utiliza-se como estímulos padrão, sinais complexos secos gravados em ambientes cujo tempo de reverberação seja quantitativamente conhecido, de preferência a partir de medições acústicas. Os estímulos de comparação serão os sinais simulados, resultantes da operação de convolução entre o sinal complexo seco e o filtro a ser validado.

O teste conhecido como MOS, do inglês, *Mean Opinion Score*, que varia em números de um a cinco, pode ser utilizado na validação dos sinais de teste simulados em relação ao sinal real. A Tabela 1 apresenta o valor numérico da escala atribuído a diferentes níveis de percepção entre os estímulos apresentados. Valores considerados satisfatórias para a validação dos resultados variam entre 4 e 5, isto é, níveis a partir dos quais não é possível julgar qual amostra é melhor, ou mesmo não se percebe diferença entre amostra original e simulada. A Figura 4 apresenta-se exemplo de comparação entre sinal original e simulado. Os resultados para o filtro adotado ainda não são suficientes, na medida em que a amostra original é melhor do que a simulada.

**Tabela 1 – Escala MOS utilizada para testes de validação de filtros artificiais de reverberação**

Número	Percepção
1	Perda completa da informação do sinal original
2	Grande distorção em relação ao sinal original
3	A amostra original é melhor do que a simulada
4	Não é possível julgar qual amostra é melhor
5	Não foi percebida diferença entre amostra original e simulada.



**Figura 4 – Espectrogramas. Em (a), sinal de teste com filtro de reverberação natural, obtido a partir de gravação no Auditório da Escola de Música da UFMG. Em (b), filtro de reverberação artificial adicionado ao sinal de teste sintetizado sem reverberação.**

### 3.2.1 Determinação da Magnitude do Estímulo Padrão

Tendo em vista que o limiar diferencial representa um incremento da intensidade física do estímulo, emerge o importante conceito de diferença apenas perceptível (dap). A dap é justamente esse incremento do nível de sensação que se origina quando o estímulo físico aumenta em um limiar diferencial, que representa um incremento ao contínuo físico.

Experimentos para determinação de limiares diferenciais realizados para outros parâmetros, têm apresentado distintas versões da relação entre a magnitude da dap ( $\Delta y$ ) com o nível de sensação ( $y$ ). Fechner, por exemplo, estabelecia que a dap é constante, com independência dos níveis de sensação de partida, implicando que sucessivas dap's são todas do mesmo tamanho. Entretanto, pesquisas realizadas em meados dos anos cinquenta, como a do psicofísico sueco Ekman sugerem para o estímulo contínuo subjetivo uma versão paralela a lei de Weber no mundo físico: a dap é diretamente proporcional ao nível de sensação, i.e.,

$$\Delta y = py \quad [\text{Eq. 05}]$$

Assim, para o presente estudo do limiar diferencial para tempo de reverberação adotou-se o valor de 1,30 segundos como magnitude do estímulo padrão. Este valor não foi determinado arbitrariamente, sendo adotado por se tratar do valor recomendado pela NBR 12179/89 como tempo de reverberação ótimo para o volume de 2141 m<sup>3</sup>, correspondente ao do auditório da Escola de Música da UFMG, estudo de caso do presente trabalho.

### 3.2.2 Determinação da Magnitude dos Estímulos de Comparação

Um conjunto de nove estímulos de comparação de diferentes magnitudes foi eleito de forma que o mais intenso seja percebido, quase sempre, como “maior que o padrão” e o menos intenso, quase sempre, como “menor que o padrão”.

**Tabela 1 – Lista de estímulos a serem utilizados no teste psicoacústico**

<b>Magnitude RT [s]</b>	<b>Tipo Estímulo</b>	<b>Magnitude RT [s]</b>	<b>Tipo Estímulo</b>
<i>1,22</i>	comparação 1	<i>1,38</i>	comparação 5
<i>1,24</i>	comparação 2	<i>1,36</i>	comparação 6
<i>1,26</i>	comparação 3	<i>1,34</i>	comparação 7
<i>1,28</i>	comparação 4	<i>1,32</i>	comparação 8
<i>1,30</i>	Padrão	<i>1,30</i>	Padrão

### **3.3 Número de sujeitos**

Considerando-se que, em experimentos para a determinação do limiar diferencial, as pessoas se constituem como variáveis independentes, uma amostra de cinco pessoas é suficiente para a realização dos testes psicoacústicos.

O experimento deve ser conduzido para cada sujeito separadamente, após o procedimento dos testes ser familiar ao sujeito. Isso pode ser conseguido através de instruções orais e escritas sobre o experimento, bem como dos objetivos do projeto.

### **3.4 Procedimento experimental**

No método dos estímulos constantes, o experimentador seleciona um determinado número de estímulos e os apresenta ao sujeito, numa ordem aleatória, sendo que para o caso da medição do limiar diferencial, em cada ensaio, apresenta-se um estímulo padrão acompanhado de um estímulo de comparação, separados temporalmente por uma pausa. Segundo Zwicker (1998), para durações de pausa entre 0,1s e 2s, os resultados são independentes da duração da mesma. Assim, adotou-se o valor máximo de dois segundos, em função de este tempo permitir uma melhor caracterização de pausa entre os dois estímulos apresentados. Para evitar erros de habituação nos resultados na ordem em que se apresentam os pares de estímulos, o estímulo padrão é apresentado aleatoriamente em ensaios sucessivos, de maneira em que o observador deve indicar em cada ensaio qual dos estímulos lhe parece maior, ou seja, em qual deles a duração é maior.

A Figura 4 apresenta o projeto do experimento psicoacústico para medição de limiar diferencial de reverberação ótima, idealizado no programa MEDS, Music Experiment Development System. Este experimento apresenta desde instruções iniciais para o sujeito (ícone 1), a apresentação dos estímulos em pares (ícones 5 e 7), um intervalo temporal entre tais estímulos (ícone 6), a escala de resposta (ícone 9), uma contagem do tempo que o sujeito demora para dar tal resposta (ícones 8 e 10), bem como a repetição do procedimento até que toda a lista de estímulos seja completamente apresentada (ícones 3 e 12).

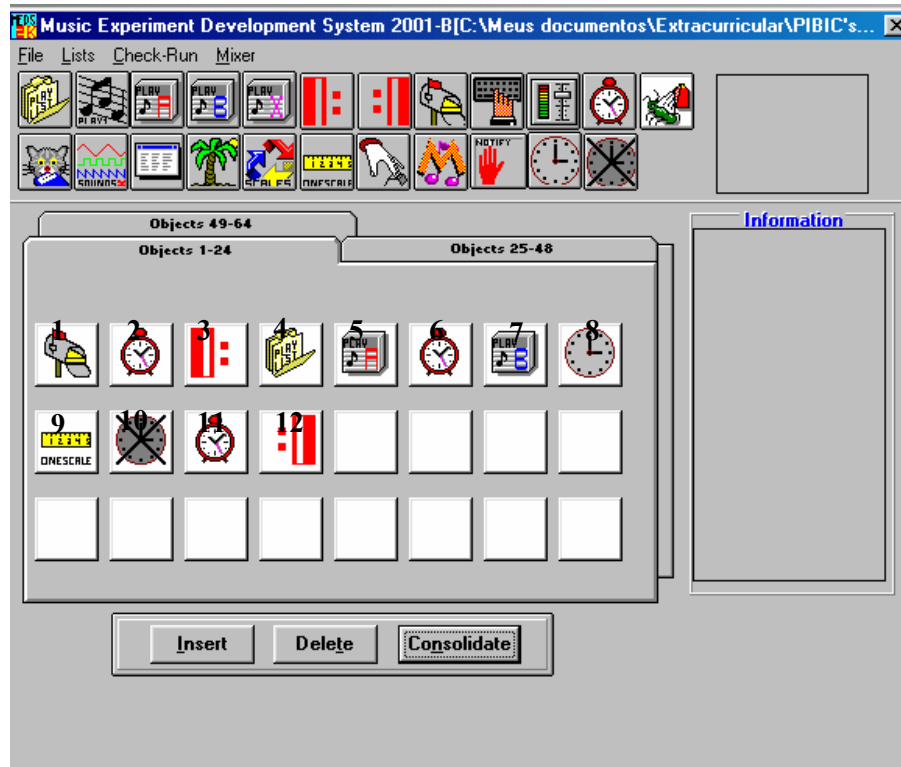


Figura 4 - Interface do programa MEDS, mostrando o projeto do experimento psicoacústico .

### 3.5 Cálculo do Limiar Diferencial

O limiar diferencial será calculado a partir do registro das respostas do sujeito, sendo a resposta definida como uma mudança mensurável no sujeito que resultou da percepção do estímulo. Como a percepção dos sujeitos é variável, convencionou-se o ponto cinquenta por cento (50%) para caracterização do limiar diferencial. Assim, o limiar diferencial é a medida da quantidade de mudança necessária para o sujeito perceber dois estímulos como diferentes em 50% dos ensaios.

De acordo com Maciel (2003), o primeiro passo para o cálculo do limiar diferencial é a determinação do intervalo de incerteza (IU), i.e., a área na qual o sujeito é incapaz de discriminar entre o estímulo comparativo e o estímulo padrão. Para tanto, é necessário o cálculo da distribuição de frequência relativa acumulada, determinando-se assim os percentis  $P_{25}(T^-)$  e  $P_{75}(T^+)$ , que são, respectivamente os limiares diferenciais inferior e superior, i.e., os valores que tenham sido julgado “maior que o padrão” em 25% e 75% das vezes, respectivamente.

$$IU = T^- - T^+ \quad [\text{Eq. 06}]$$

A importância da determinação do intervalo de incerteza reside no fato de que o limiar diferencial (LD) corresponde à mediana de tal intervalo.

$$LD = \pm \frac{IU}{2} \quad [\text{Eq. 07}]$$

Outro valor importante a ser determinado neste tipo de experimento é o ponto de igualdade subjetiva (PIS), que é o ponto no qual o estímulo de comparação e o padrão parecem iguais ao sujeito, apesar dos estímulos serem fisicamente distintos. Assim, o PIS é calculado obtendo-se a média entre  $T^+$  e  $T^-$ .



$$PIS = \frac{1}{2}(T^+ + T^-) \quad [\text{Eq. 08}]$$

A determinação do PIS é importante, na medida em que o sujeito está cometendo um erro, em termos de valores físicos reais, quando estima a igualdade de dois estímulos distintos. Assim, a diferença entre o PIS e o estímulo padrão é chamada de erro constante (CE), cuja medida é obtida subtraindo-se o valor do estímulo padrão ( $y_p$ ) do ponto de igualdade subjetiva (PIS).

$$CE = PIS - y_p \quad [\text{Eq. 09}]$$

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, apresentou-se uma revisão do método de medição de limiar sensorial, mais especificamente de limiar diferencial de tempo de reverberação ótimo, introduzindo-se conceitos e técnicas de processamento digital de sinais. A presença de um erro constante nas medidas deste parâmetro indica mais uma vez que os mundos de mensuração físico e psicológico não são idênticos, refletindo ainda as grandes incertezas inerentes a este tipo de experimento. A variabilidade da percepção do sujeito indica que o limiar não é um valor absoluto, mas uma aproximação estatística.

A realização dos testes em laboratórios, em detrimento a experimentos psicoacústicos em salas protótipo, apresentam-se ideais do ponto de vista do controle e projeto experimental. Ressalta-se, entretanto, a importância da validação dos estímulos a serem utilizados nos testes, sejam eles obtidos por simulação computacional ou gravações. Para tanto, enfatiza-se a realização do teste MOS, entre estímulos simulados e originais. O programa MEDS mostra-se como uma ferramenta eficaz neste processo de implementação de testes psicoacústicos, seja para validação dos estímulos, seja para os experimentos propriamente ditos.

A utilização de sinais de teste sintetizados, bem como de interfaces computadorizadas para os testes apresentam como principal vantagem à padronização do experimento como um todo. O grande desafio da metodologia apresentada é justamente a validação dos filtros de reverberação artificial para que os resultados obtidos possam efetivamente contribuir para melhoria da qualidade acústica dos espaços projetados.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO Brasileira de Normas Técnicas. (1989) NBR 12179. *Tratamento Acústico em Recintos fechados*. ABNT.

MACIEL, M.A. (2003) *Estudo de limiar de reverberação ótima para performance musical*. Relatório Final de Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq). UFMG. Belo Horizonte.

ZWICKER, E. FASTL, H. (1998) *Psychoacoustics: Facts and Models*. Heidelberg. Springer-Verlag,

#### AGRADECIMENTOS

A autora gostaria de agradecer aos laboratórios da UFMG onde a pesquisa foi desenvolvida, Centro de Pesquisa de Música Contemporânea (CPMC) e Centro de Estudos da Fala, Acústica, Linguagem e Música (CEFALA), bem como ao Conselho Nacional de Pesquisa Tecnológica – CNPq-, entidade financiadora do projeto.