

# TÉCNICA HÍBRIDA SEGMENTADA PONDERADA APLICADA À ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS ACÚSTICOS DE SALAS

## (Híbrid Segmented Swept Sine)

Paulo, Joel Preto  
ISEL-DEETC

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1949-014 Lisboa, Portugal, [jpaulo@deetc.isel.ipl.pt](mailto:jpaulo@deetc.isel.ipl.pt)  
Telefone: +351.218.317.180, Fax: +351.218.317.114

Martins, Carlos Rodrigues  
Escola Náutica Infante D. Henrique,  
Paço D'Arcos, Oeiras, 2780, Portugal, [carlosmartins@enautica.pt](mailto:carlosmartins@enautica.pt)  
Telefone: +351.214.460.010, Fax: +351.214.460.326

Coelho, J. L. Bento  
CAPS - Instituto Superior Técnico  
Lisboa, Portugal, [bcoelho@ist.utl.pt](mailto:bcoelho@ist.utl.pt)  
Telefone: +351.218.419.393, Fax: +351.218.465.303

*A aplicação da técnica de Varrimento Sinusoidal Logarítmico - Swept Sine - aplicada à acústica de salas tornou-se usual devido à sua elevada SNR e robustez contra pequenos valores de não-linearidades e variância no tempo da sala em teste. No entanto, a presença de fontes de ruído não estacionário, por exemplo presença de pessoas na vizinhança, ruído de génese viária ou ainda ruído proveniente do decorrer das actividades de espectáculo pode implicar um valor de SNR baixo para uma correcta estimação dos parâmetros acústicos. Este tipo de ruído apresenta grandes flutuações de energia ao longo do tempo e da frequência. Este estudo explora esta característica no sentido de permitir um aumento da SNR no final do processamento.*

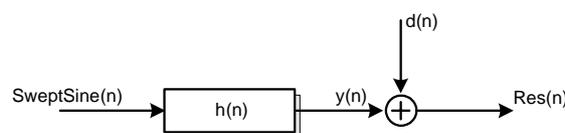
*A técnica Híbrid Segmented Swept Sine consiste em enviar para a sala com um conjunto de  $M$  tramas Swept Sine.*

*Cada trama é dividida em  $N$  segmentos e onde cada segmento é analisado por bandas de frequência através da aplicação de um banco de filtros, ou seja, é feita uma análise fina da energia nos domínios do tempo e da frequência. A partir das energias obtém-se uma função de ponderação no tempo e na frequência que é aplicada às tramas utilizando de seguida a técnica de médias temporais.*

*Testes realizados para vários tipos de sinais de ruído revelaram incrementos significativos da SNR. A técnica Híbrida de Segmentação Ponderada mostrou que, para determinados tipos de sinal de ruído, existem incrementos de SNR superiores a 15 dB (ruído do tipo fala) em relação à técnica Swept Sine.*

A estimação dos parâmetros acústicos de salas é realizada com base na caracterização da sua Resposta ao Impulso (RI). O erro cometido nesta estimação relaciona-se directamente com a Relação Sinal Ruído (SNR) existente, sendo o erro máximo admissível dependente do parâmetro acústico pretendido [1-3]. A técnica de medição acústica utilizando o Varrimento Sinusoidal Logarítmico (*Swept Sine*) tem provado bons resultados no que diz respeito ao aumento da SNR, imunidade à Invariância no Tempo e a não linearidades [4]. Contudo, em situações de SNR baixa (níveis sonoros elevados de ruído de fundo), os resultados das análises, por exemplo para o Isolamento Sonoro de fachadas (IA), Tempo de Reverberação (RT60), Amplitude da Resposta em Frequência, podem ficar comprometidos, mesmo recorrendo à aplicação de técnicas do tipo médias temporais [5].

Em certa aproximação, é possível modelar um recinto por um Sistema Linear e Invariante no Tempo (SLIT) com adição de ruído à sua saída. Este modelo está representado na Figura 1.



**Figura 1: Diagrama de blocos de um SLIT com ruído aditivo.**

O SLIT é descrito por

$$\text{Res}(n) = \text{SweptSine}(n) * h(n) + d(n) = y(n) + d(n), \quad (1)$$

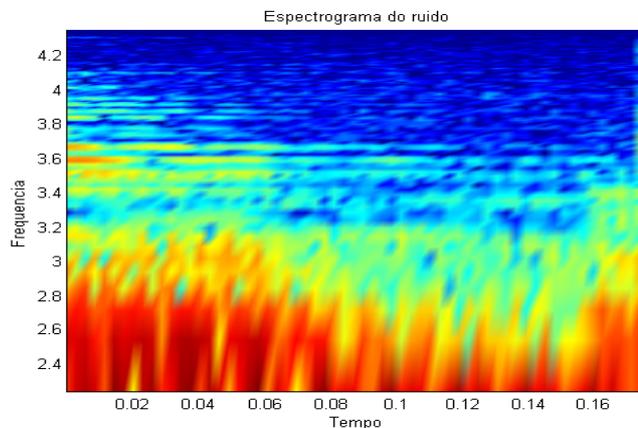
onde \* corresponde à operação de convolução.

A estimação da SNR é realizada por intermédio da expressão [6]

$$\text{SNR} = \frac{\text{MS}(y(n))}{\text{MS}(d(n))}, \quad (2)$$

onde MS representa o valor quadrático médio.

As medições acústicas são geralmente realizadas em situações onde o ruído apresenta um comportamento não-estacionário, tendo variações de energia assinaláveis quer no domínio do tempo quer no domínio da frequência. Um exemplo deste facto pode ser observado na Figura 2.



**Figure 2: Valor instantâneo do sinal de ruído e respectivo valor rms (figura da esquerda).  
Espectro do ruído obtido em duas janelas temporais diferentes.**

Neste sentido, a análise deve ser desenvolvida com base em critérios de variação energética do ruído nos domínios do tempo e frequência [7, 8].

## Método

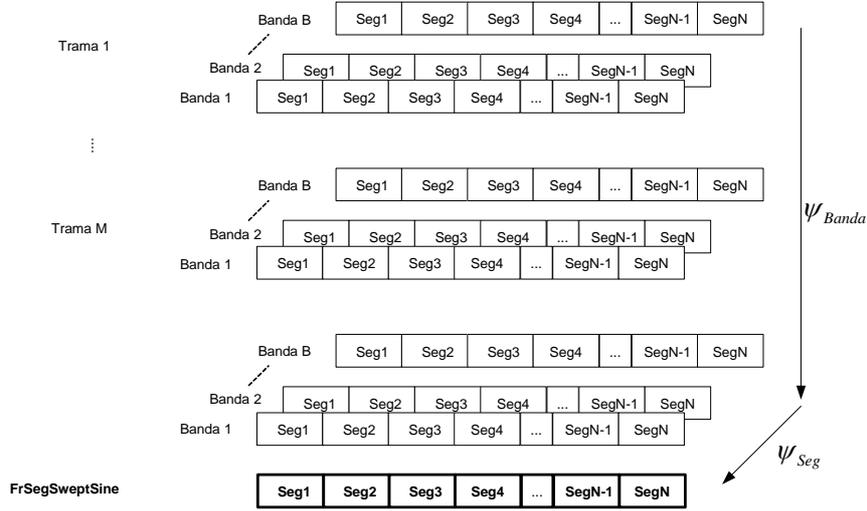
A técnica *Híbrido Segmented Swept Sine* consiste em enviar para a sala com um conjunto de  $M$  tramas *Swept Sine* seguidas (sem atraso entre elas). A duração de cada trama depende do valor do RT60 e as frequências de início e fim do varrimento dependem da banda de frequências que se pretende analisar.

A estimação da RI, em situações onde o ruído é do tipo não-estacionário, é feita com a minimização do valor MS da totalidade da trama  $\text{Res}(n)$  resultante. Para tal, a aplicação da técnica de médias temporais é precedida com a ponderação da energia ao longo de cada trama [9-12] no sentido de dar mais ênfase às tramas com menos energia (tramas menos corrompidas pelo ruído), uma vez que a energia do sinal de teste é o mesmo para cada trama. Este procedimento visa incrementar, ainda mais, a SNR final.

O método proposto consiste em dividir cada trama em  $N$  segmentos e onde cada segmento é analisado por bandas de frequência através da aplicação de um banco de filtros, ou seja, é feita uma análise fina da energia nos domínios do tempo e da frequência. A partir das energias obtém-se uma função de ponderação em tempo e frequência que é aplicada às tramas utilizando de seguida a técnica de médias temporais. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos simplificado deste método.

No diagrama proposto, a técnica de médias é aplicada a cada coluna (domínio do tempo) e a cada linha (domínio da frequência) com factores de ponderação dados pelas funções  $\psi_{Seg}$  e  $\psi_{Banda}$ , respectivamente. Este procedimento garante que aos segmentos e bandas de frequência mais corrompidos pelo ruído (maior energia) seja dado menos ênfase melhorando consequentemente a SNR.

A trama que resulta da aplicação deste processo é utilizada para estimar a RI da sala.



**Figura 4: Diagrama para implementação da técnica Híbrida Segmentada Swept Sine. A trama resultante FrTSSegSweptSine corresponde à ponderação do conjunto das M tramas pelas funções  $\psi_{Seg}$  e  $\psi_{Banda}$  com aplicação da técnica de médias.**

O produto  $\psi_{Banda} \cdot \psi_{Seg}(Res_k(n))$  expressa a acumulação para os segmentos da coluna  $k$  [6]

$$a_k(n) = \psi_{Banda} \psi_{Seg}(Res_k(n)) = \frac{1}{W_k} \left[ \sum_{j=1}^B \frac{1}{W_{Bkj}} \left( \sum_{i=1}^M l_i Res_{ki}(n) \right) \right] = \frac{1}{W_k} \left[ \sum_{j=1}^B \frac{1}{W_{Bkj}} \left( \sum_{i=1}^M l_{ki} l_{Bkij} (y_j(n) + d_{ij}(n)) \right) \right] \quad (3)$$

onde  $l_{ki} = \frac{1}{MS(Res_{ki}(n))}$  é o factor de ponderação para o segmento  $k$  e a trama  $i$ ,  $W_k = \sum_{i=1}^M l_i$  é o factor de

normalização para a coluna  $k$ ,  $l_{Bkij} = \frac{1}{MS(Res_{Bki}(n))}$  é o factor de normalização para a banda  $j$ , segmento  $k$  e

trama  $i$ , e  $W_{Bkj} = \sum_{i=1}^M l_{Bki}$  é o factor de normalização para a banda  $j$ .

Tendo em atenção que a energia de  $y(n)$  se mantém constante para os segmentos homólogos (na mesma coluna) das várias tramas, a Eq. (3) pode ser reescrita da forma seguinte:

$$a_k(n) = y(n) + \frac{1}{W_k} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkij} d_{ij}(n)}{W_{Bkj}} = a(n) w[n - (k-1)L_{seg}]$$

onde  $w(n)$  é a janela temporal utilizada para a análise de cada segmento e  $a(n)$  é a trama completa definida

$$\text{por } a(n) = FrTSSegSweptSine(n) = \sum_{k=1}^N a_k(n)$$

$$= \sum_{k=1}^N \left( y_k(n) + \frac{1}{W_k} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n)}{W_{Bkj}} \right) = y(n) + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n)}{W_k W_{Bkj}}.$$

A  $\text{SNR}_{FrTSSegSweptSine}$  é estimada por Eq. (2). O valor MS da componente do ruído vem dada por:

$$\begin{aligned} \text{MS}(d'(n)) &= \text{MS} \left( \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n)}{W_k W_{Bkj}} \right) \\ &\approx \sum_{i=1}^M \text{MS} \left( \underbrace{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n)}{W_k W_{Bkj}}}_{\text{Trama } i} \right) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \text{MS} \left( \sum_{j=1}^B \frac{l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n)}{W_k W_{Bkj}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Assumindo filtragem ideal

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^B \frac{\text{MS}(l_{ki} l_{Bkj} d_{kij}(n))}{W_k^2 W_{Bkj}^2} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{\text{MS}(l_{ki} l_{Bki} d(n))}{W_k^2 W_{Bk}^2} = \sum_{i=1}^M \frac{1}{W_N^2 W_B^2} \text{MS}(l_{Ni} l_{Bi} d(n)) = \frac{M}{W_N^2 W_B^2} \text{MS}(l_N l_B d(n))$$

com  $l_N(n) = l_N[n/N]$  e  $l_B(n) = l_B[n/B]$ . O valor MS de  $y(n)$  é proporcional à potência acústica do sinal de teste e é um valor constante entre cada trama. Desta forma, o valor MS deve ser normalizado para fins de comparação do desempenho entre a técnica *Híbrid Segmented Swept Sine* e a *Swept Sine*.

A  $\text{SNR}_{FrTSSegSweptSine}$  é estimada por:

$$\text{SNR}_{FrTSSegSweptSine} = \frac{W_N^2 W_B^2}{M} \frac{\text{MS}(y(n))}{\text{MS}(l_N(n) l_B(n) d(n))} \quad (5)$$

O ganho  $\Delta\text{SNR}$  entre a *Híbrid Segmented Swept Sine* e a *Swept Sine* pode ser expresso por:

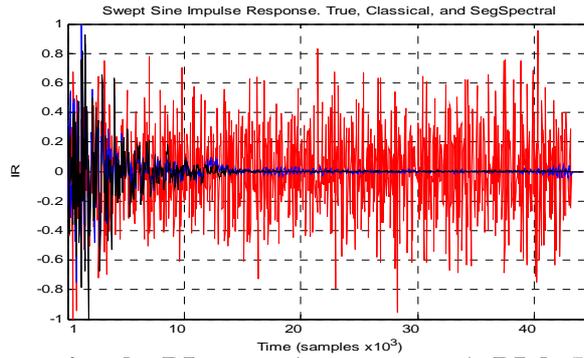
$$\Delta\text{SNR} = \frac{\text{SNR}_{FrTSSegSweptSine}}{\text{SNR}_{Class}} = \frac{W_N^2 W_B^2}{M^2} \frac{\text{MS}(d(n))}{\text{MS}(l_N(n) l_B(n) d(n))} \geq 1, \quad (6)$$

## Resultados Experimentais

O principal objectivo das análises realizadas referem-se ao incremento de SNR entre a *Híbrid Segmented Swept Sine* e a *Swept Sine*. Os testes foram realizados considerando a banda completa de áudio (frequência de amostragem de 44100 Hz) e com um banco de filtros de bandas de oitava. Utilizou-se a resposta ao impulso de uma sala real (medida sem ruído) com um valor de RT60 de cerca de 0,5s. A influência do comprimento dos segmentos nos resultados foi investigada usando um janela temporal do tipo *Hanning*, utilizaram-se segmentos com 1024 e 2048 amostras (dependendo do tipo de ruído). O ruído consistiu em trechos musicais e de fala com diferentes intensidades. O número de tramas *Swept Sine* utilizado para cada teste foi de 126 para a conveniente aplicação da técnica de médias temporais.

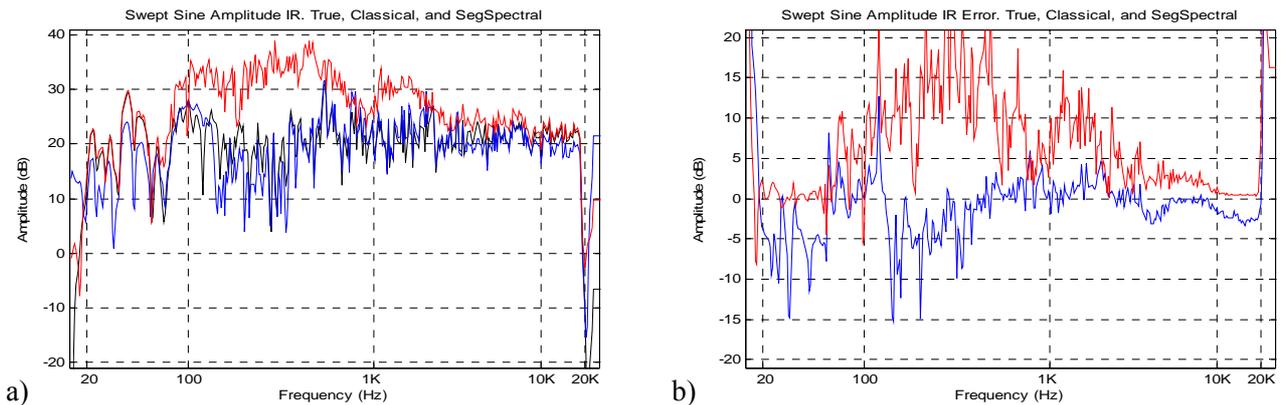
As Figuras 5-7 mostram, respectivamente, os resultados da estimação da RI, resposta de amplitude, erro da resposta de amplitude, decaimento energético e erro do decaimento energético. A análise aqui apresentada refere-se ao ruído do tipo *jazz/rock* com -24dB de SNR.

Como se observa pela Figura 5, a estimação de RI para a *Híbrid Segmented Swept Sine* apresenta um erro muito menor que para o caso de *Swept Sine*.

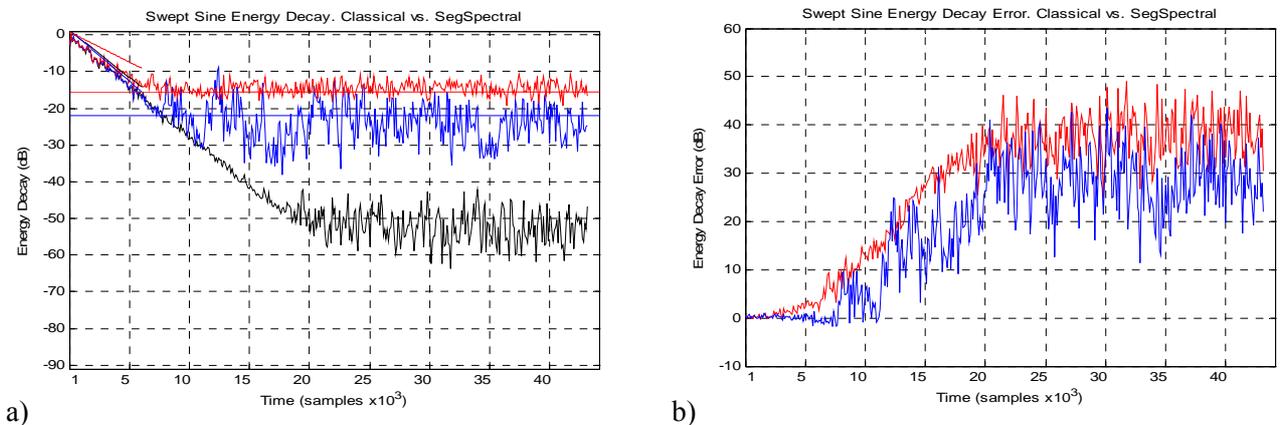


**Figura 5: Resposta ao Impulso estimada. RI exacta (curva a preto), RI de *Híbrido Segmentado Swept Sine* (curva a azul) e *Swept Sine* (curva a vermelho).**

Os resultados mostram que o erro na estimação da resposta de amplitude de RI é consideravelmente superior com a utilização da *Swept Sine* atingindo 15 dB numa banda de frequências extensa, com a técnica proposta este valor é reduzido para cerca de 6 dB. O ruído de fundo da estimação do Decaimento Energético mostra um incremento de 9 dB para a *Híbrido Segmentado Swept Sine* em relação a *Swept Sine*. Outra questão importante é o valor médio do decaimento da energia que se relaciona com o RT60. Observa-se que o valor do declive da recta para a *Swept Sine* afasta-se bastante do valor exacto, indicando que o RT60 não possa ser estimado convenientemente, no entanto, para a técnica proposta este desvio é mínimo.



**Figura 6: Estimação da Resposta de Amplitude de RI a) e Erro da Resposta de Amplitude de RI b). Resposta exacta (curva a preto), *Híbrido Segmentado Swept Sine* (curva a azul) e *Swept Sine* clássica (curva a vermelho).**



**Figura 7: Decaimento Energético a). Erro do Decaimento Energético b). Resposta exacta (curva a preto), *Híbrido Segmentado Swept Sine* (curva a azul) e *Swept Sine* (curva a vermelho). As rectas horizontais correspondem à energia do ruído de fundo de processamento e rectas oblíquas à taxa de decaimento da energia da RI.**

## Conclusões

Apresenta-se a técnica *Híbrida Segmentada Sine* baseada em *Sine* para aplicações no campo da acústica arquitetural.

Esta nova técnica oferece vantagens quando aplicada em situações de ruído com características não-estacionárias e/ou baixa SNR.

A comparação do desempenho das técnicas *Híbrida Segmentada Sine* e *Sine* revela um incremento significativo da SNR. Este facto foi verificado com a utilização de RI reais (medidas em salas reais).

Os resultados deste estudo revelam que o ganho de SNR é fortemente condicionado pelas características estatísticas do ruído, como se prova na Eq. (6). Por exemplo, para ruído do tipo fala, a técnica *Híbrida Segmentada Sine* apresenta ganhos de cerca de 17 dB em relação à técnica *Sine*.

A estimação da RI, a resposta de amplitude, o erro da resposta de amplitude, o decaimento energético e o erro do decaimento energético foram alvo de estudo. Os resultados mostram que, de uma forma geral, os erros associados à técnica *Híbrida Segmentada Sine* são inferiores quando comparados com a técnica *Sine*.

A continuação deste trabalho numa fase futura aponta para um estudo mais detalhado das características estatísticas do sinal de ruído, ie. espectro, transitórios (attack/sustain) em tempo real. O sistema a desenvolver terá a possibilidade de se parametrizar a SNR de entrada e a mínima SNR final de forma que as medições experimentais terminem quando a SNR a pretendida.

## Referências

- [1] Rife, D. D., Vanderkooy, J., Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences, J. Audio Eng. Soc., Vol. 37, No. 6, 1989.
- [2] Vorlander, Michael, Mommertz, E., "Guidelines for the Application of the MLS Technique in Buildings Acoustics and in Outdoor Measurements", *Proc. Inter-Noise 1997*, Budapest, Hungary, August, 1997.
- [3] Vorlander, Michael, "Applications of Maximum Length Sequences in Acoustics", I *Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações*, Petrópolis, RJ, Brasil, December, 1996.
- [4] Farina, A., "Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept Sine Technique", Audio Eng. Soc. 108<sup>th</sup> Convention, Paris, France, 2000.
- [5] Fausti, P., Farina, A., Pompoli, R., "Measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment", *Proc. of ICA98 – International Conference on Acoustics*, Seattle, USA, 26-30 June, 1998.
- [6] Nielsen, Johan L., Improvement of Signal-To-Noise Ratio in Long-Term MLS Measurements with High Level Nonstationary Disturbances, J. Audio Eng. Soc., Vol. 45, No. 12, 1997.
- [7] Paulo, J., Martins, C. R., Bento Coelho, J. L., "Room Impulse Response Measurement in the Presence of High Noise Levels using Maximum Length Sequences (MLS)", *Proc. ICSV 2000*, Germany, 2000.
- [8] Farina, A., F. Righini, "Software implementation of a MLS analyzer, with tools for convolution, auralization and inverse filtering", Pre-prints of the 103<sup>rd</sup> AES Convention, New York, USA, 26-29 September 1997.
- [9] Paulo, J., Martins, C. R., Bento Coelho, J. L., "Determinação da Resposta Impulsional de Espaços Fechados Utilizando a Técnica de Sequências de Comprimento Máximo", *Proc. TecniAcustica*, Spain, 1999 (in Portuguese).
- [10] Paulo, J., Martins, C. R., Bento Coelho, J. L., "Room Impulse Response using Segmented Maximum Length Sequences (MLS) for Annoyance Minimization". *Proc. TecniAcustica – EAA Symposium on Architectural Acoustics*, Madrid, Spain, 2000.
- [11] Paulo, J., Martins, C. R., Bento Coelho, J. L., "Time Segmented Swept Sine Technique for Room Impulse Response Estimation". *Proc. ICSV 12*, Lisbon, Portugal, 2005.
- [12] Paulo, J., Martins, C. R., Bento Coelho, J. L., "Time Segmented Swept Sine Technique for SNR Enhancement". *Proc. Forum Acusticum*, Budapest, Hungary, 2005.