



## Quinto stato di avanzamento della ricerca sulla valutazione della prestazione acustica dell'impianto audio nell'abitacolo degli autoveicoli

**Reggio Emilia, 7 dicembre 2000**

### **Temi di Ricerca**

Il programma di ricerca biennale 1999/2000 prevedeva questi temi di ricerca:

- A) Messa a punto della nuova tecnica di rilevamento della risposta di altoparlanti mediante eccitazione con segnale sinusoidale "sweepato", al fine di determinare simultaneamente la risposta in frequenza, la risposta all'impulso e la distorsione armonica. La metodica è ormai operativa e normalmente impiegata per la prova degli impianti vettura, assieme alla più tradizionale metodica MLS. Il metodo è stato ampiamente descritto nel precedente stato di avanzamento (n.4) e nell'articolo pubblicato alla 108th AES Conference [13]
- B) Realizzazione di un CD audio contenente segnali di prova per la misurazione oggettiva di un impianto audio vettura, e brani musicali assortiti per la successiva valutazione soggettiva. Dopo un anno di utilizzo intensivo del CD, già descritto nel precedente stato di avanzamento, ci si è resi conto che la scelta dei brani non è stata delle più felici. Nel corso del prossimo anno si procederà dunque ad una selezione di un nuovo set di brani di test, sulla base di un processo di scelta ottimizzato, a partire da valutazioni soggettive formalizzate mediante questionari.
- C) Impiego dei sistemi di cui ai punti A) e B) per l'acquisizione della risposta acustica di un certo numero di vetture da sottoporre a valutazione comparativa oggettiva e soggettiva. Le misure sono state effettuate ripetutamente su 4 diverse autovetture, ma purtroppo si è osservato che in alcuni casi (ad es. Alfa 156) la valutazione soggettiva sui segnali registrati non necessariamente forniva le stesse indicazioni dei test di ascolto in vettura. Quando invece le differenze da valutare sono più evidenti, allora il metodo di valutazione virtuale fornisce risultati pressochè coincidenti con gli ascolti in vettura. Si è dunque evidenziato che la tecnica sin qui sviluppata, pur decisamente migliorativa rispetto a quelle tradizionali, è ulteriormente perfezionabile. I punti su cui è necessario lavorare sono la riproduzione dei fenomeni non lineari (distorsione) e la localizzazione spaziale delle sorgenti sonore apparenti.
- D) Analisi dei risultati delle misure di cui al punto precedente onde individuare un certo numero di parametri acustici oggettivi, ricavabili mediante elaborazione automatica al computer delle risposte all'impulso misurate; è stato sviluppato un nuovo modulo di analisi delle risposte all'impulso per CoolEdit, che consente la visualizzazione della risposta all'impulso e della curva di decadimento per ciascuna banda di frequenza. È stato inoltre possibile ottenere risposte all'impulso calibrate in ampiezza, e quindi

- misurare la intensità relativa del livello sonoro per un fissato livello del segnale elettrico fornito agli altoparlanti.
- E) Esecuzione di test comparativi soggettivi, basati sulle registrazioni musicali effettuate al punto C), e restituzione mediante le tre diverse tecniche già messe a punto dell'ascolto in cuffia, dell'ascolto su coppia di altoparlanti (Stereo Dipole) e dell'ascolto in camera con array di altoparlanti tipo Ambisonics. Gran parte dello sforzo si è concentrato sulla messa a punto della camera di ascolto, che tuttavia non è ancora pienamente operativa: il trattamento acustico ambientale, i sedili ed il sistema di amplificazione sono soddisfacenti, mancano tuttavia una decina di diffusori di ottima qualità, sufficientemente lineari da risultare "trasparente" in fase di riproduzione del campo sonoro registrato entro l'abitacolo. Di conseguenza, la maggior parte dei test soggettivi comparativi è stata effettuata utilizzando le cuffie.
- F) Identificazione delle caratteristiche oggettive ottimali dell'impianto sonoro. Nonostante siano stati misurati un gran numero di parametri acustici, si è evidenziato che le variazioni degli stessi non corrispondono sistematicamente alle variazioni delle percezioni soggettive. In pratica, l'analisi della covarianza ha fornito un grado di correlazione significativo (positivo o negativo) solo per coppie oggettivo-soggettivo assolutamente ovvie, quali distorsione-spiacevolezza, rumore-spiacevolezza, esaltazione dei bassi-piacevolezza, numero di altoparlanti-effetto spaziale. La conclusione è stata che i tradizionali parametri acustici non sembrano rappresentare compiutamente i fenomeni fisiologici e psicologici che avvengono nel corpo umano nel corso dell'ascolto in macchina. E' emersa dunque la necessità di identificare una nuova metrica basata su misure oggettive, ma più aderente alla percezione umana.
- G) Miglioramento dei programmi di calcolo attualmente disponibili per la previsione matematica del campo sonoro entro l'abitacolo: l'algoritmo di tracciamento delle piramidi è stato ampliato [14], ed ora è in grado di simulare la presenza di superfici diffondenti, o di piccole dimensioni (per cui si ha diffusione da parte dei bordi delle stesse): questo rende il tracciamento di piramidi più idoneo allo studio di cavità di piccole dimensioni, rispetto alla precedente versione "speculare" che richiedeva intrinsecamente che le dimensioni di ogni superficie fossero grandi rispetto alla lunghezza d'onda.
- H) Sviluppo di soluzioni impiantistiche per l'applicazione in vettura di posizionamenti innovativi degli altoparlanti, in particolare la configurazione "Stereo Dipole" ed il montaggio diretto sul pannello porta. La ricerca si è concentrata massicciamente sulla seconda ipotesi, nell'ambito della ricerca svolta in collaborazione con ECIA. Sono stati eseguiti numerosi test a bordo dell'autovettura Honda Civic in seguito ai quali è stato possibile realizzare tre serie di test di ascolto in cuffia. I risultati dei test non hanno mostrato una chiarissima preferenza per un tipo di fissaggio dell'altoparlante rispetto all'altro, sebbene sia risultato evidente come particolari secondari relativi al fissaggio del diffusore o del pannello alla portaroducano rilevanti modificazioni (soprattutto timbriche) nel suono riprodotto dall'altoparlante.

Nel seguito vengono illustrati i principali risultati conseguiti (alcune parti sono in inglese, perchè tratte da report sviluppati in tale lingua onde essere trasmessi a partner stranieri quali ECIA).

## Statistical analysis of the comparative subjective test between different mountings of a loudspeaker on the Honda Civic driver's door

### 1. Methods

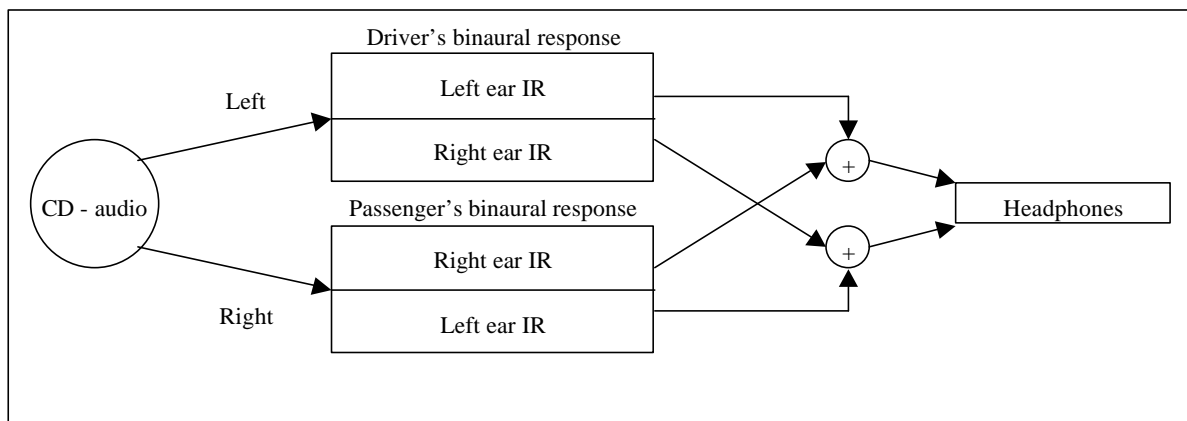
The sound samples were prepared making use of the Auralization technique. First, the binaural impulse responses were measured at the driver seat and at the passenger seat, feeding the loudspeaker mounted on the driver's door with MLS signal through a MLSSA board.

The measurement was made making use of a Bruel & Kjaer dummy head type 4100, connected with the MLSSA board through the microphone preamplifier type 2672. The following photograph shows the measurement situation.



After having measured the binaural impulse responses for the two seats, we swapped the channels of the impulse response measured on the passenger seat. This way, it approximated the impulse response of the driver's seat when the right door loudspeaker is working.

The auralization process was finally done, convolving 4 stereo samples with the two sets of binaural impulse responses, as in the following scheme:



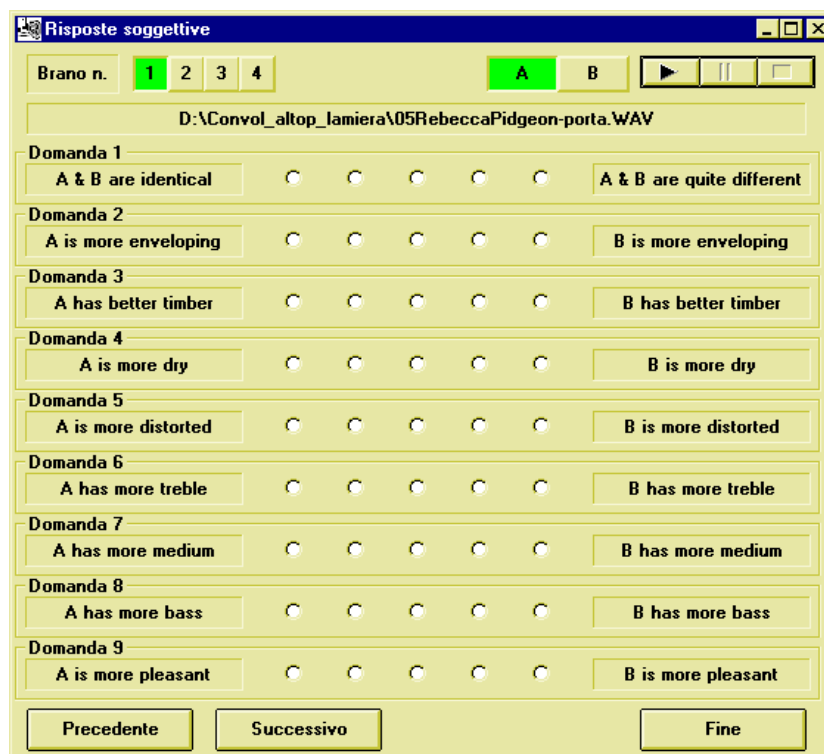
This process was repeated for both loudspeaker configurations (mounted on the steel frame of the door, case A, and on the plastic panel, case B), and for the following 4 music samples:

- 1) Rebecca Pidgeon – A Spanish Harlem
- 2) Dire Straits – Brothers in Arms
- 3) Aerosmith – Amazing
- 4) Sawuka – Asimbonanga

This way, 8 sound samples (4 A/B pairs) were obtained. The sound samples were stored in WAV files on a PC hard disk. The presentation was made through headphones (Sennheiser HD580 Precision) connected to the PC through a Echo Layla sound board and a B&K type ZE0760 Headphone Amplifier.

A proper test software was written, for collecting the subjective responses.

The following image shows the user's interface of the subjective response program:



## 2. Subjective results

11 subjects filled up the questionnaire. At each response, a numerical score ranging between 1 to 5 was assigned: 1 means the leftmost item was selected, 5 is the rightmost, and the intermediate integer values (2,3,4) correspond to the intermediate responses on the 5-step subjective scale shown in the previous picture.

Sample A was always the one obtained with the loudspeaker mounted on the metal frame of the door, sample B was with the loudspeaker fixed only to the plastic panel.

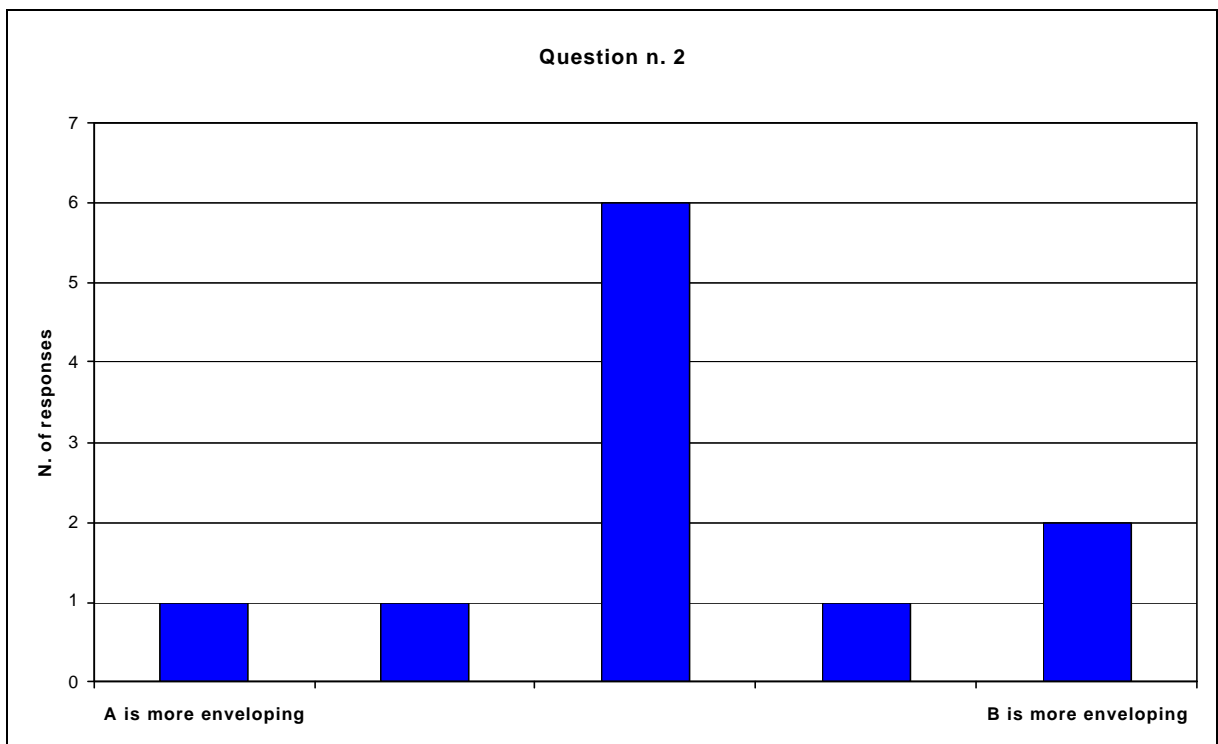
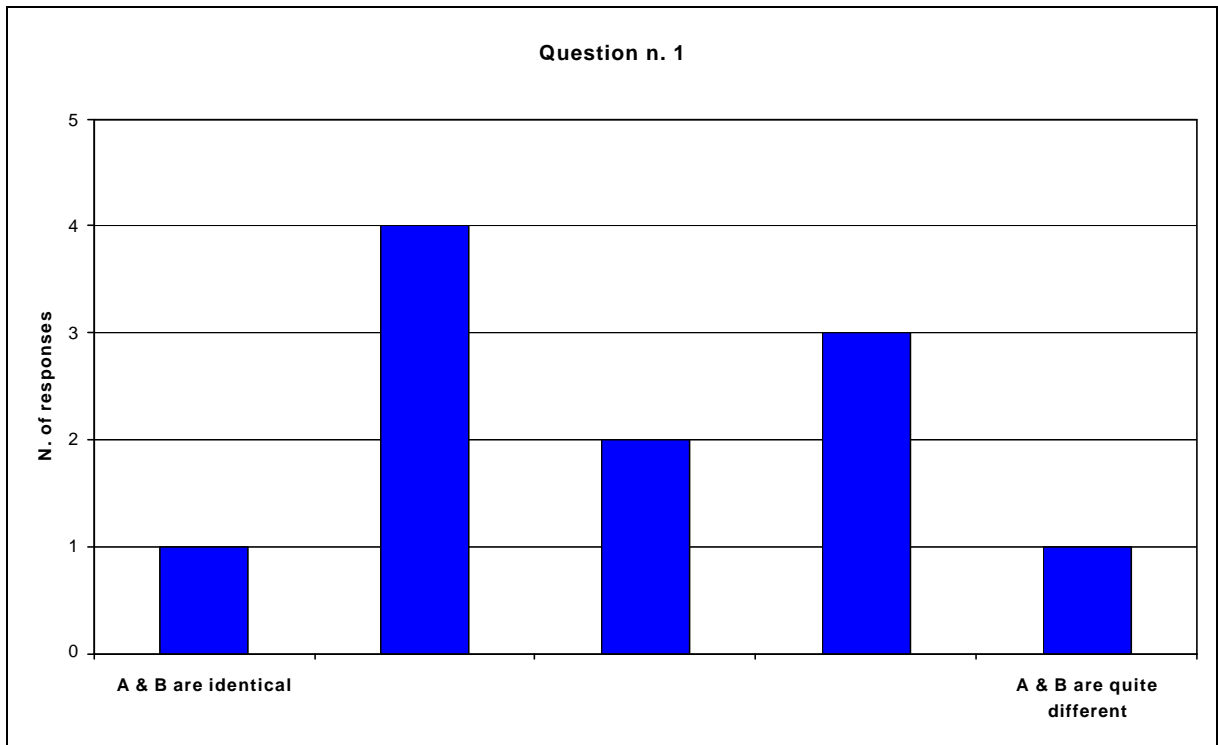
The following table contains the whole matrix of subjective responses:

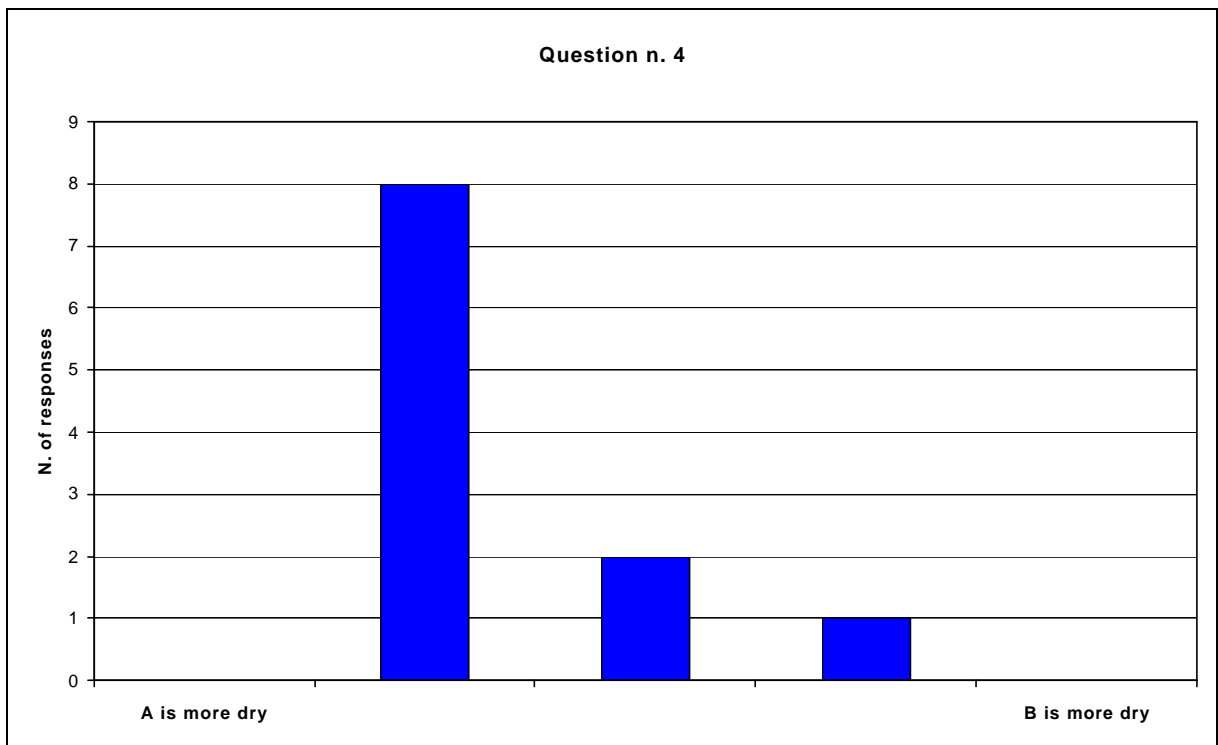
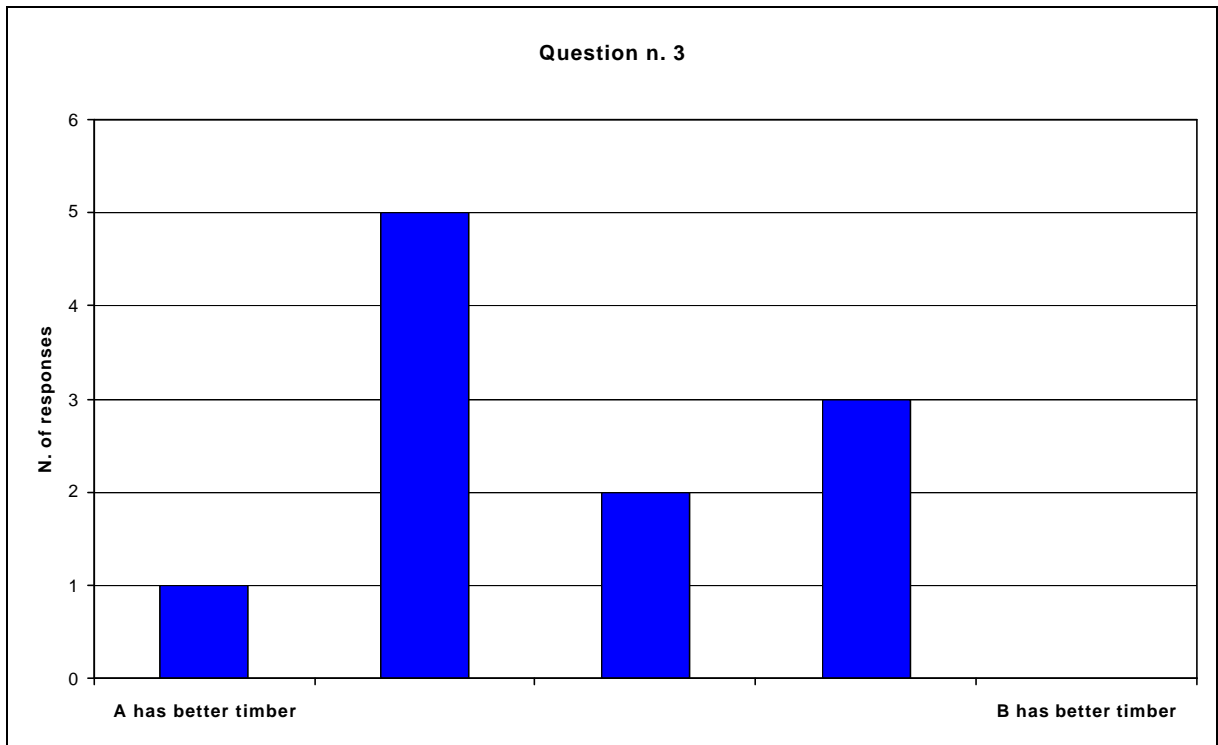
Question	Response of subject N.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A & B are identical / quite different	4	3	2	5	3	4	2	4	2	2	1
A / B is more enveloping	1	4	3	5	3	3	3	5	3	3	2
A / B has better timber	1	3	2	4	3	4	2	4	2	2	2
A / B is more dry	3	2	2	2	2	2	2	4	3	2	2
A / B is more distorted	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3
A / B has more treble	4	2	3	2	2	2	2	4	3	2	4
A / B has more medium	3	3	4	4	4	3	3	2	3	3	3
A / B has more bass	1	4	2	3	4	2	4	5	3	3	2
A / B is more pleasant	2	4	3	5	3	3	2	4	3	2	2

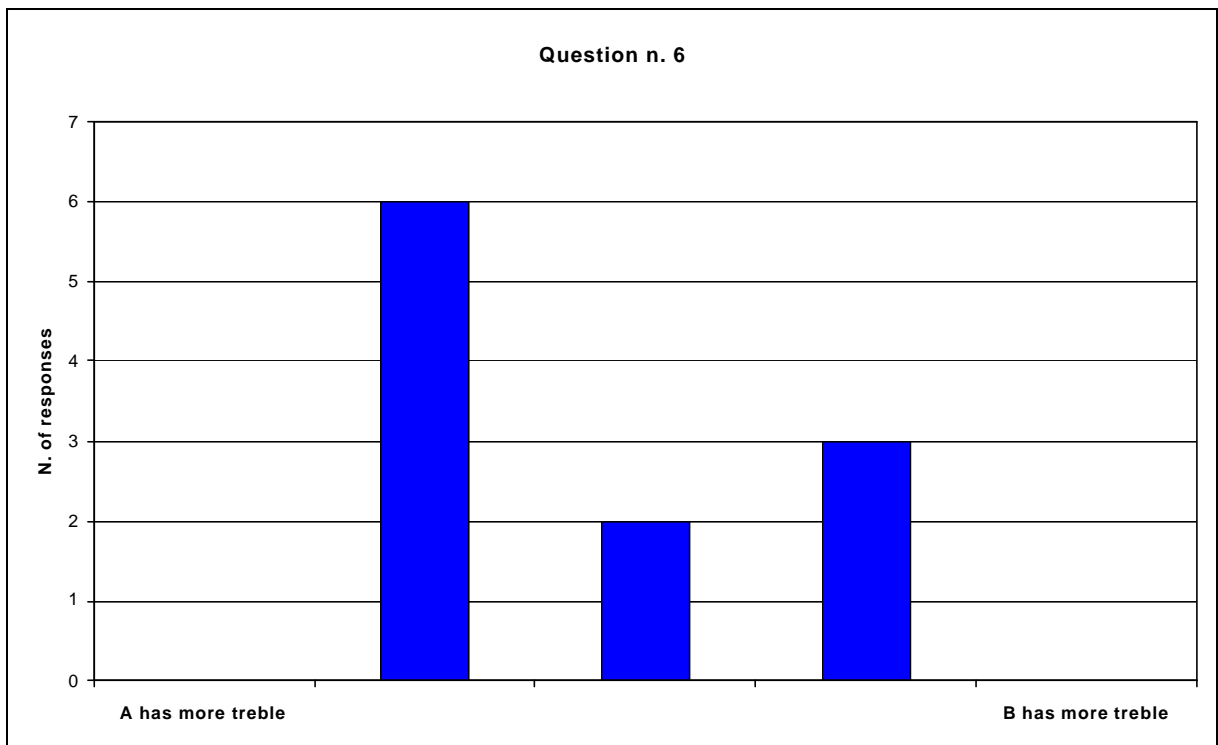
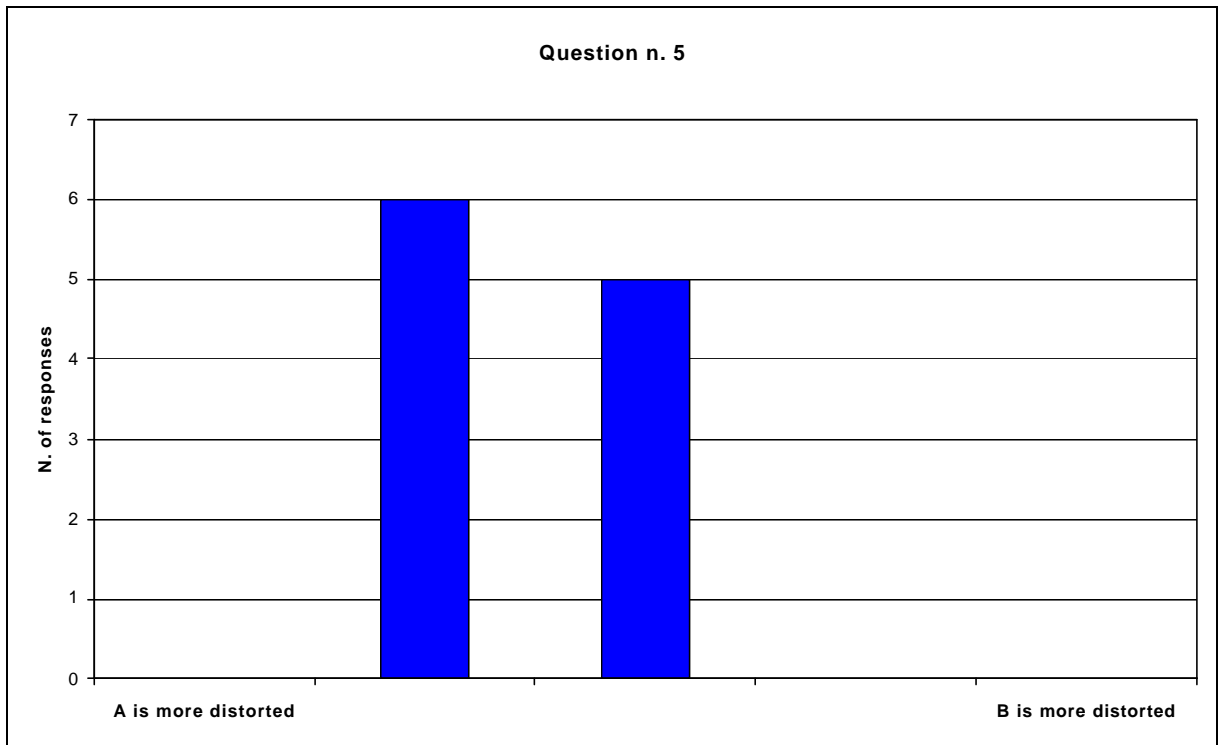
A first statistical analysis can be obtained simply counting the number of each response for a given question (i.e., the number of responses equal to 1, the number of responses equal to 2, and so on). This way, the statistical distribution of the responses to each question is constructed, as shown in the following table:

Question	N. of 1	N. of 2	N. of 3	N. of 4	N. of 5
A & B are identical / quite different	1	4	2	3	1
A / B is more enveloping	1	1	6	1	2
A / B has better timber	1	5	2	3	0
A / B is more dry	0	8	2	1	0
A / B is more distorted	0	6	5	0	0
A / B has more treble	0	6	2	3	0
A / B has more medium	0	1	7	3	0
A / B has more bass	1	3	3	3	1
A / B is more pleasant	0	4	4	2	1
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>38</b>	<b>33</b>	<b>19</b>	<b>5</b>

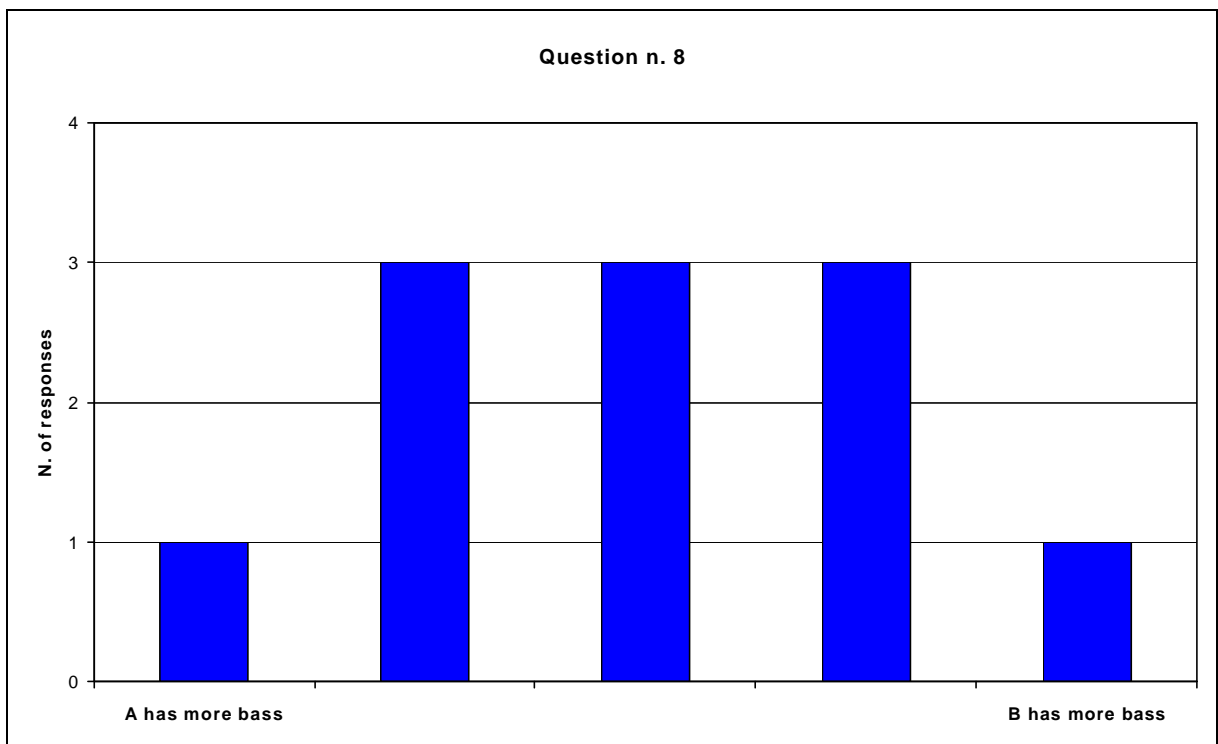
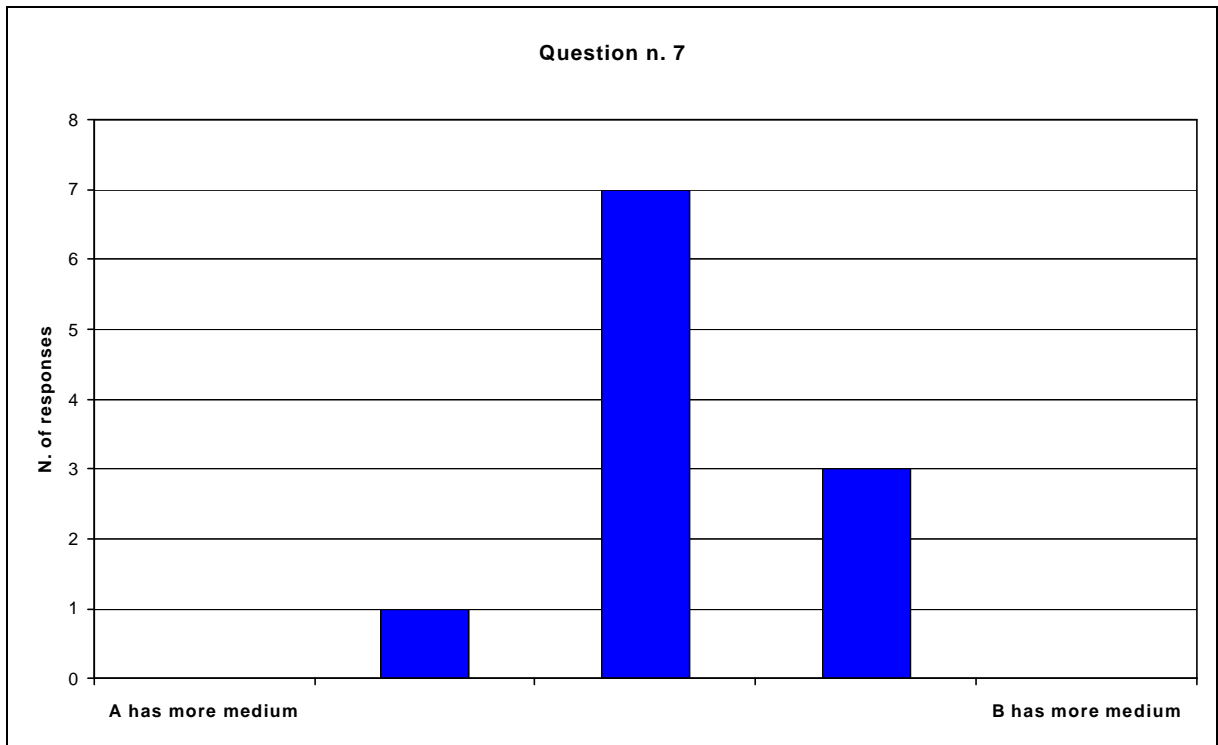
This set of data can graphically plotted, for easy visual inspection of the statistical distributive histogram. The following 9 pictures show these statistical histograms for the 9 questions.

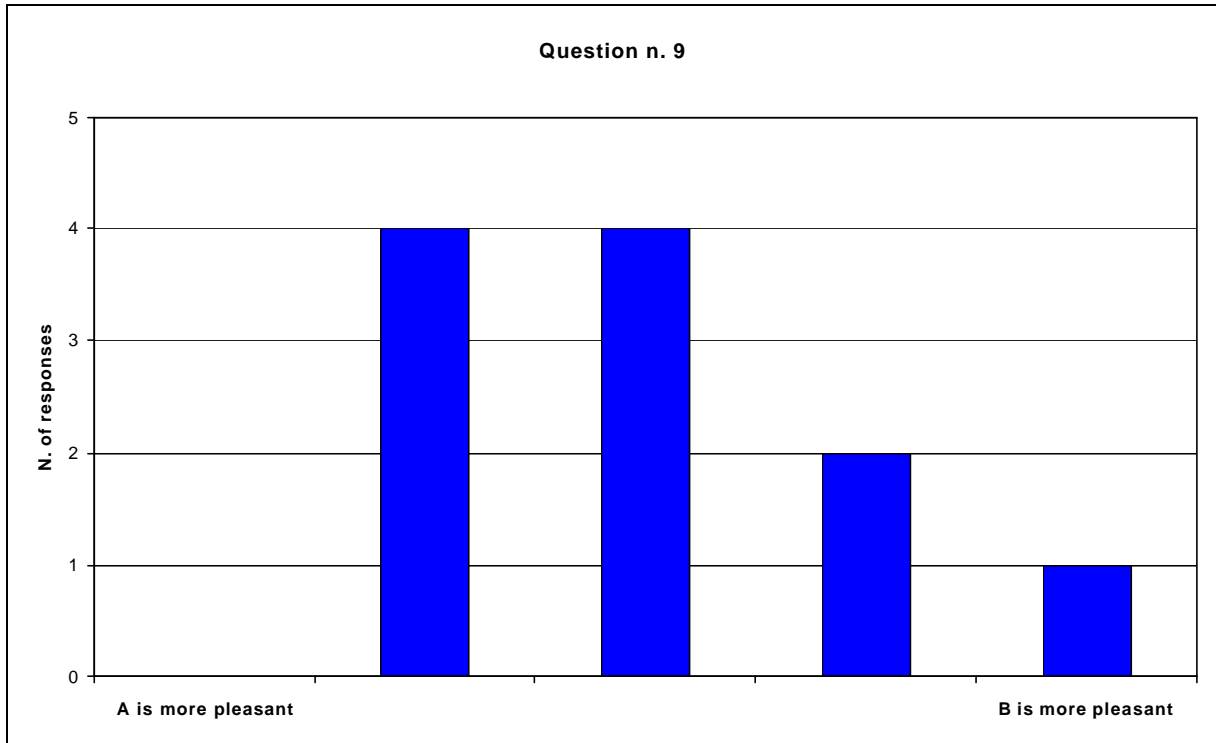












Finally, a traditional ANOVA was performed on the subjective data, with the goal of assessing statistically the significance of the perceived difference between the two different montages of the loudspeaker.

The following table contains the principal statistical results (average and standard deviation) for each question, along with the deduced conclusion:

N.	Question	Average	StdDev	Conclusion
1	A & B are identical / quite different	2.909	1.221	Some difference is evident
2	A / B is more enveloping	3.182	1.168	No signif. difference in enveloping
3	A / B has better timber	2.636	1.027	A has slightly better timber than B
4	A / B is more dry	2.364	0.674	A is substantially more dry than B
5	A / B is more distorted	2.455	0.522	A is more distorted than B
6	A / B has more treble	2.727	0.905	A has slightly more treble than B
7	A / B has more medium	3.182	0.603	A has slightly less medium than B
8	A / B has more bass	3.000	1.183	No difference in bass response
9	A / B is more pleasant	3.000	1.000	No preference for A or B

### 3. Conclusions

The above subjective responses are statistically significant for assessing some realistic points:

- A) The two different montage methods of the loudspeaker on the car's door cause subtle, but audible differences. These were perceived by the vast majority of subjects.
- B) None of the montage methods was preferred to the other. Each one exhibits minor perceived advantages and disadvantages over the other.
- C) More in detail, the mounting on the steel frame (A) causes more distortion, has better overall timber, is more dry and slightly enhances the treble.
- D) On the other hand, the mounting on the plastic panel (B) is less distorted, although the timbre balance is worse, is less dry (particularly at low frequency, where the response is longer) and enhances slightly the medium frequency response.

In conclusion, it appears that the two solutions are not really very different: the A/B comparison technique was capable of exploiting very minor differences, and the fact that globally there was no preference for one of the two cases, and that most people systematically produced responses very near to the midscale (score = 3) means that in practice the two solutions are equipollent.

## Subjective evaluation of three fixing methods for the loudspeaker on the Honda Civic door

### 1. Foreword

The present report illustrates the final results of the subjective experiments conducted on three possible fixing methods of the loudspeaker onto the door of an Honda Civic car.

The three fixing methods, labelled A, B and C, were as follows:

B : ORIGINAL - the loudspeaker is screwed on a plastic gasket, directly fixed onto the steel frame of the door. The plastic panel is rigidly attached to the steel frame, through screws and aluminium supports (very rigid).

C : MODIFICATION 1 – the loudspeaker was screwed directly onto the plastic panel (with a little misalignment with respect to method B, the center was displaced approximately 20mm apart). The plastic panel remained rigidly attached to the steel frame as in method B.

A: MODIFICATION 2 – the loudspeaker was screwed directly onto the plastic panel, as in solution C. Now the plastic panel is elastically connected to the steel frame, by the way of plastic protuberances and corresponding female receptacles in plastic pieces attached to the frame. The fixing is very weak, due to the compliance of the fixing devices.

The letters employed for labelling each case were the same employed through the subjective tests. They were shuffled from the “natural order” (A,B,C) for avoiding too easy recognition of the presentation order of the stimuli to the subjects.

It must also be noted that each of the three cases above required the use of a different plastic panel, specifically printed by ECIA for the tests.

The goal of the test was to explore the perceptual differences between the sound emitted by the loudspeaker inside the car compartment in the three cases. Maximum care was taken for ensuring that nothing else changed among the three cases: loudspeaker, power amplifier, binaural microphone, preamplifier and recording device (computer with high quality sound board) were maintained always the same, with the same settings of any parameter.

## **2. The sound samples**

With each loudspeaker setup, 4 different sound samples were digitally recorded. A CD player was feeding a CREST reference power amplifier, regulated for 2 V RMS output amplitude at 0 dB FS. The 4 samples were:

- 1) Rebecca Pidgeon – Spanish Garden
- 2) Dire Straits
- 3) Amazing
- 4) Assimbonanga

A Bruel & Kjaer type 4100 dummy head was placed at the driver seat (the one nearest to the left door, where the loudspeaker was mounted). Only the left channel of the power amplifier was connected, and this caused a mono reproduction on the left loudspeaker only.

Nevertheless, due to the car environment, the binaural recording still contain a certain amount of spatial information: the predominance of sound coming from the left was indeed quite noticeably by listening to the recordings by headphones.

The signals coming from the dummy head microphones were digitally recorded (at 44.1 kHz, 16-bit) through a GdgetLabs Wave8/24 sound board and saved in standard WAV files for subsequent reproduction.

With the same setup, the binaural impulse response was also measured, making use of the MLS test signal.

For the comparative test, however, the “live” recordings inside the car were employed: in fact it resulted that the virtual reconstruction obtained by convolution of the original music source with the system’s impulse response was lacking of non-linear effects (distortion), which instead were faithfully captured by the “live” recordings.

These 12 sound samples were then employed in a triplet-wise listening comparison test. Two versions of the test were prepared, one for headphone listening, the second for loudspeaker presentation. In the first case, only a very small spectral equalization was required, correcting for the frequency response of the headphones employed for reproduction.

The headphone (Sennheiser HD580) was placed over the dummy head, the transfer function was measured, and a minimum-phase inverse filter was computed for flattening the magnitude of the transfer function. The following picture shows the headphone on the dummy head.



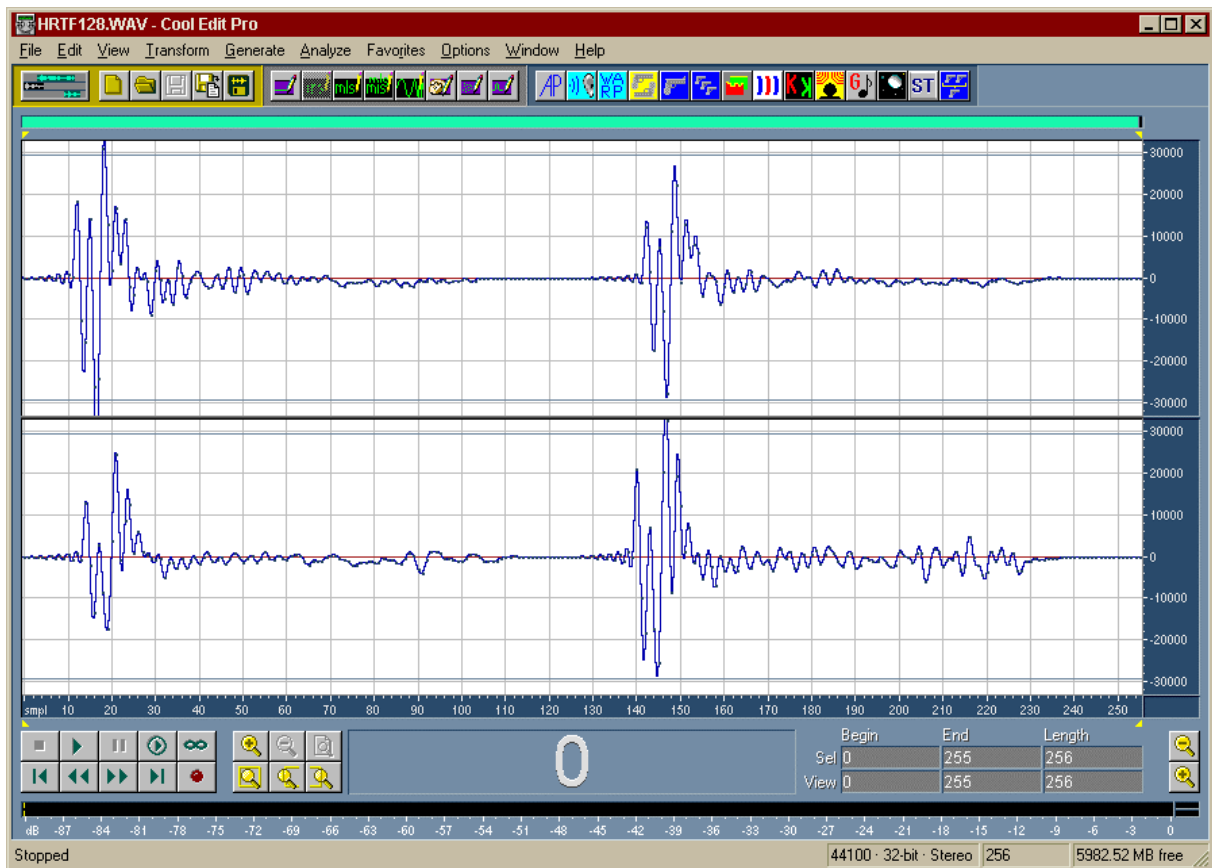
The 12 sound samples were convolved with this equalizing FIR filter, and saved in a specific directory, ready for faithful headphone reproduction.

The presentation over loudspeakers required a much more complex digital processing. The dummy head was placed in front of a pair of high-quality, self-powered studio monitors (Audio Link AL-105, equipped with Dynaudio woofers and tweeters), and the 4 transfer functions between each loudspeaker and each microphone were measured with the MLS method.

The following picture shows the dummy head in front of the loudspeaker pairs, located in the Stereo-Dipole geometric configuration.

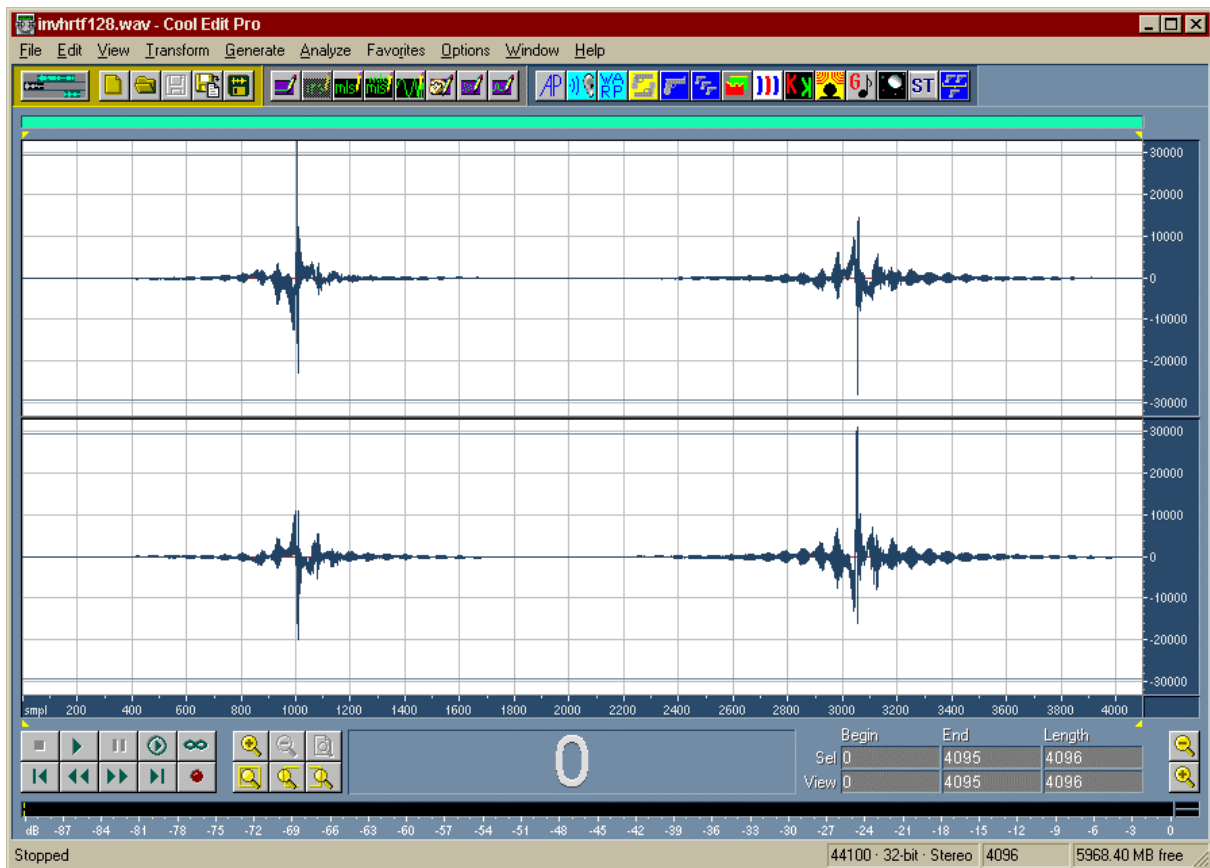


The following picture shows the set of 4 impulse response obtained by the measurement.

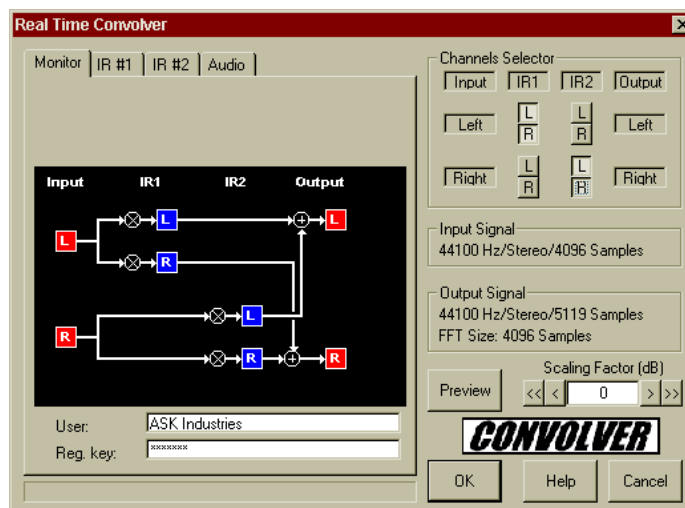


A proper set of 4 inverse filters was computed, so that the sound reproduced over the loudspeaker pair after having been filtered, arrives without alteration on the corresponding ear, but with almost complete cancellation of the cross-talk paths (avoiding that the left channel is heard by the right ear, and vice-versa).

The following picture shows these 4 inverse cross-talk-cancelling filters.



The 12 sound samples were convolved with this set of 4 inverse filters, arranged in the cross-talk canceling network shown in the next picture, and saved in a proper directory, ready for reproduction over the stereo-dipole loudspeaker pair.



### 3. Subjective evaluation through a questionnaire

The triplet-wise comparisons were automated, thanks to a special software written for the purpose in Visual Basic. This software allows for the playback of the WAV files, with on-the-fly switching among the three version of each music piece, recorded with the three different loudspeaker mountings (labeled A,B and C)

Switching the recording, also the corresponding response form is switched, so that the subject can easily place his evaluation on the corresponding form avoiding any risk of confusion between the three samples. In this way, the subject always respond to the questionnaire pertinent to the sound he is listening.

The following picture shows the user's interface of the software for collection of the questionnaires.

9 questions are presented to the subject: the first 5 are “centered” questions, in which two opposite attribute are presented, the optimal situation being in the middle of the scale (these questions are also called “horizontal”). The last 4 questions instead are “monolateral”, they correspond to an absolute quality evaluation which is maximally attained on the right, and which is absent on the left (these questions are also called “vertical”).

The position of the selection buttons is converted by the software in a numerical integer value (1 to 5). This means that the optimal response to the first 5 question is 3, and the optimal response to the latter 4 question is 5.

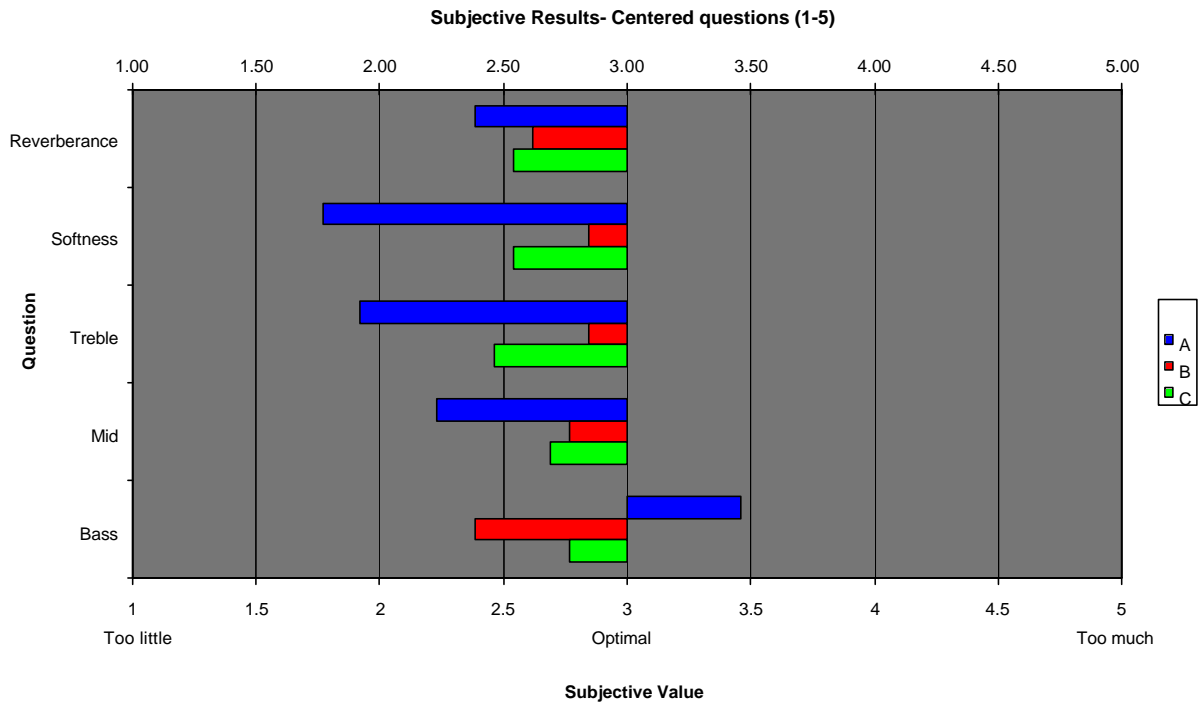
13 subjects were employed for the subjective test: 3 of them employed the loudspeaker reproduction, the other 10 preferred to employ the headphones.

The following table contains the average and standard deviation values of the subjective response collected by the three loudspeaker mountings to the 9 questions:

N.	Subj. Attribute	A		B		C		Opt.Value
		Mean	St.Dev.	Mean	St.Dev.	Mean	St.Dev.	
1	Reverberance	2.38	1.50	2.62	0.96	2.54	1.05	3
2	Softness	1.77	0.93	2.85	1.07	2.54	0.88	3
3	Treble	1.92	1.12	2.85	0.69	2.46	0.88	3
4	Mid	2.23	1.36	2.77	1.17	2.69	0.95	3
5	Bass	3.46	1.71	2.38	0.96	2.77	1.01	3
6	Envelopment	2.23	1.36	3.00	1.22	2.77	1.24	5
7	Naturality	1.85	1.07	2.92	1.19	2.69	1.11	5
8	Distortion	2.31	1.03	3.08	1.32	3.08	1.38	5
9	Pleasantness	1.54	0.52	3.38	1.26	2.85	1.28	5

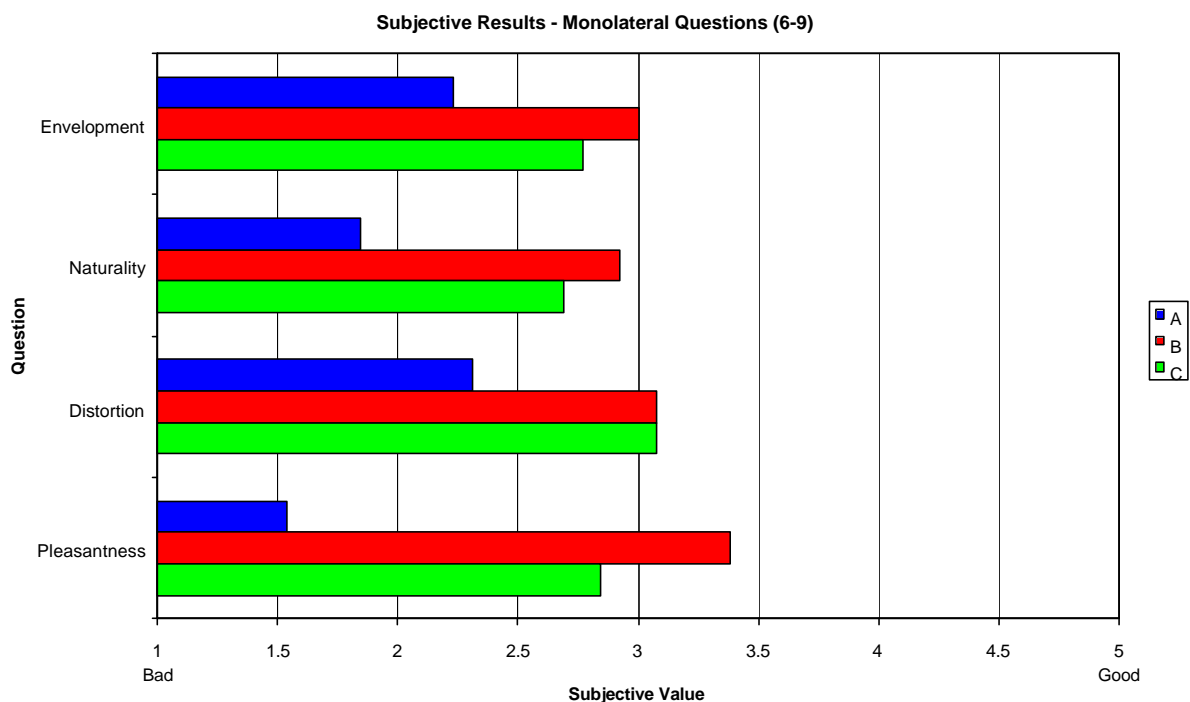


The average values of the first 5 “centered” questions are reported graphically in the following picture:



It appears evident that system B is the preferred for the first 4 question, instead in question 5 system C is the best one, followed by system 1. Apart from question 5, system A (the one with the loudspeaker attached to the pastic panel, with elastic mounting of this to the steel frame) resulted largely the worst one, presenting too much reverberance and softness, weak treble and mid response, and bass too much enhanced.

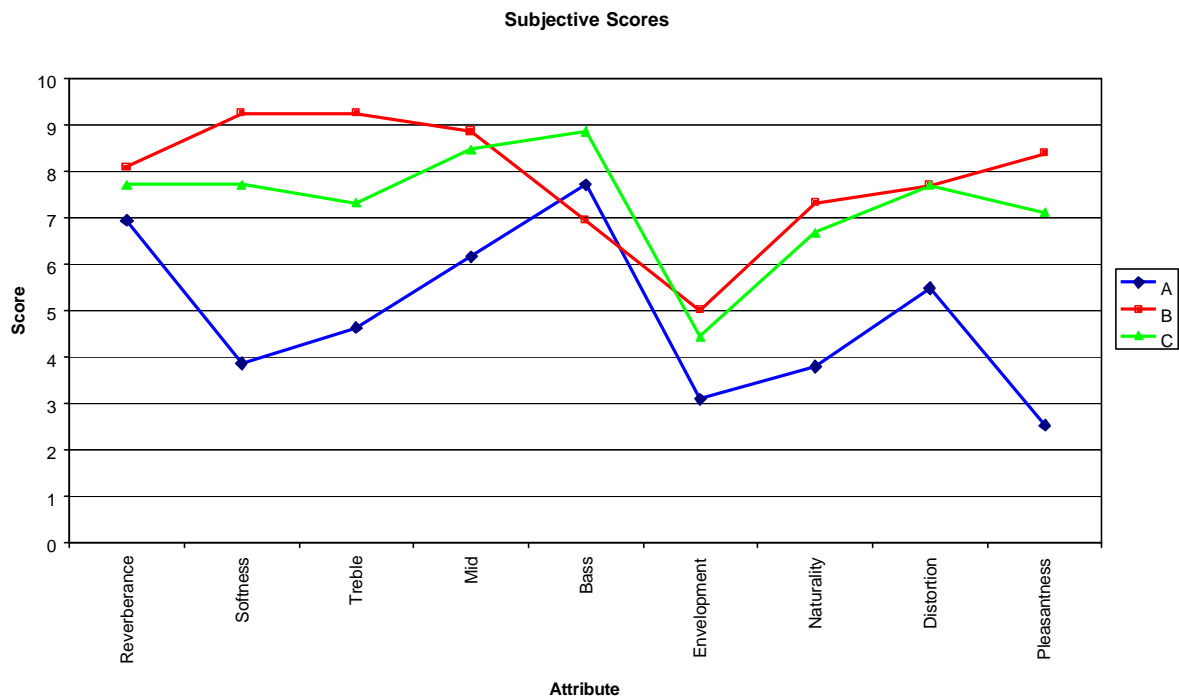
The following picture presents the average results for the last 4 “monolateral” questions :



Also in this case system B was always considered the best one (original mounting of the loudspeaker directly on the steel frame), followed immediately by system C, whilst system A is much worst.

A global comparison between all these results can be made by assigning a score to each average response: for the first 5 questions, a linear scoring from 0 to 10 was computed (0 to the extreme response values of 1 and 5, and 10 to the center value of 3). Instead, for the last 4 questions, the score 0 to 10 was assigned mapping parabolically the response values (so that 1 maps to 0, 3 maps to 7.5 and 5 maps to 10).

The following picture presents the scores of the 9 questions obtained by the three systems:



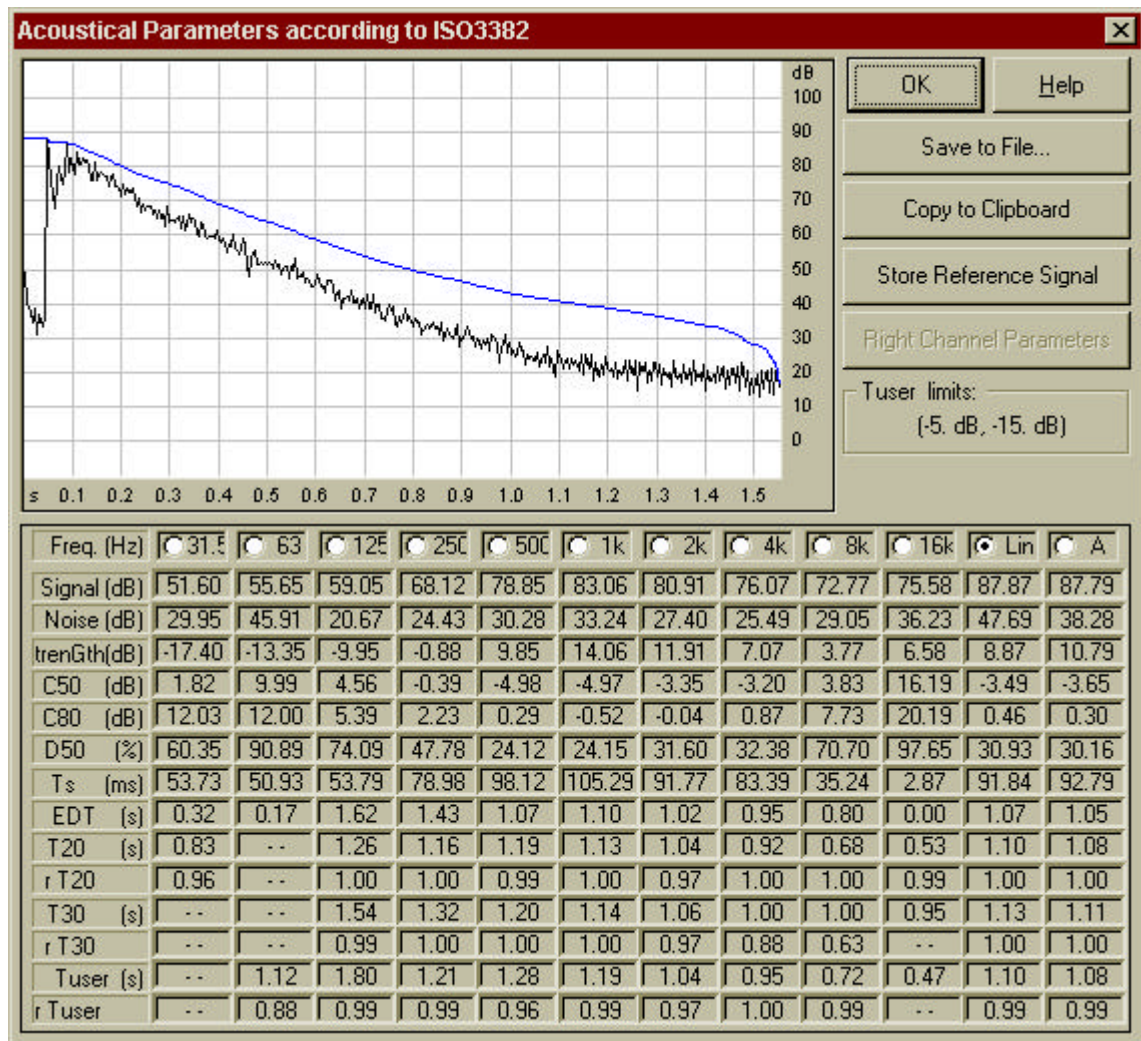
As expected, system B is always the most scored one, except for question n. 5 (Bass response), where system C was preferred.

The unhappy conclusion is that, although the mounting of the loudspeaker on the plastic panel is substantially acceptable when the plastic panel is rigidly fixed to the steel frame of the door, when the plastic panel is weakly and elastically supported the degradation of the acoustical response becomes unacceptable.

This fact could be corrected only with a different structural design of the plastic panel, which should be more rigid and better connected to the steel frame.

### **Nuovo modulo di analisi dei parametri acustici oggettivi**

E' stato sviluppato un nuovo modulo per l'elaborazione delle risposte all'impulso misurate in ambienti confinati, basato sul calcolo dei parametri acustici descritti nella norma ISO 3382/1997. La seguente figura mostra l'interfaccia utente del nuovo modulo di misura, implementato come già fatto in passato sotto forma di "plug-in" per il programma CoolEdit.



Il modulo visualizza graficamente il profilo temporale della risposta all'impulso, con sovrapposta la curva di decadimento ottenuta dall'integrazione di Schroeder. La tabella numerica sottostante contiene i valori di numerosi parametri acustici oggettivi, definiti nella norma ISO3382. In particolare viene calcolato:

- 1) Livello del segnale, in dB-SPL, normalizzato alla durata convenzionale di 1s. Tale valore coincide con il livello di singolo evento (SEL), definito come:

$$SEL = 10 \log_{10} \frac{\int_0^T p^2 dt}{p_0^2 \cdot 1s}$$

- 2) Livello del rumore, sempre normalizzato ad 1s, in modo che la differenza fra S ed N fornisca il valore corretto del rapporto segnale-rumore
- 3) Strength (G): parametro definito come differenza fra il livello sonoro in dB-SPL ed il livello di potenza della sorgente, meno una costante (31 dB). Esprime concettualmente l'incremento di livello sonoro causato dalla riverberazione e dalle riflessioni entro la cavità, rispetto al livello che sarebbe stato prodotto da una sorgente sonora omnidirezionale, in campo libero, a 10m di distanza.

- 4) Chiarezza C50: è il rapporto (espresso in dB) fra l'energia che arriva nei primi 50 ms dopo il suono diretto rispetto a quella che arriva in seguito (da 50 ms all'infinito). E' un parametro indicativo della comprensione del parlato, ed il suo valore ottimale è compreso fra + 2 e - 2 dB.
- 5) Chiarezza C80: è il rapporto (espresso in dB) fra l'energia che arriva nei primi 80 ms dopo il suono diretto rispetto a quella che arriva in seguito (da 80 ms all'infinito). E' un parametro indicativo dell'ascolto musicale, ed il suo valore ottimale è compreso fra + 2 e - 2 dB.
- 6) Indice di Definizione D50: è il rapporto (espresso in %) fra l'energia che arriva nei primi 50 ms dopo il suono diretto rispetto all'energia totale di tutta la risposta all'impulso. E' un parametro indicativo della comprensione del parlato, ed il suo valore ottimale è compreso fra 70 e 90 %.
- 7) Tempo baricentrico  $T_s$ : è definito come il momento del primo ordine dell'energia lungo l'asse dei tempi, a partire dal tempo di arrivo del suono diretto. E' pertanto definito come:

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2 dt}{\int_0^{\infty} p^2 dt}$$

- 8) Tempo di riverbero precoce (EDT): è il tempo di riverberazione classico ( $T_{60}$ , ovvero il tempo necessario ad un decadimento di 60 dB), ma estrpolato dal tratto iniziale della curva di decadimento, cioè dal suo inizio sino ad un punto situato a soli -10 dB da tale inizio. E' un parametro più idoneo del tempo di riverbero classico per la valutazione della riverberazione in piccoli ambienti.
- 9) Tempi di riverbero "classici"  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  e  $T_{user}$ . Sono anch'essi dei tempi di riverbero  $T_{60}$ , ma etrapolati rispettivamente tra:
  - da -5 a -25 dB ( $T_{20}$ )
  - da -5 a -35 dB ( $T_{30}$ )
  - lungo il range definito dall'utente ( $T_{user}$ )
- 10) Coeff. di correlazione  $r$ : è un indicatore della rettilineità della curva di decadimento nel tratto della stessa su cui è stato valutato il tempo di riverbero corrispondente.

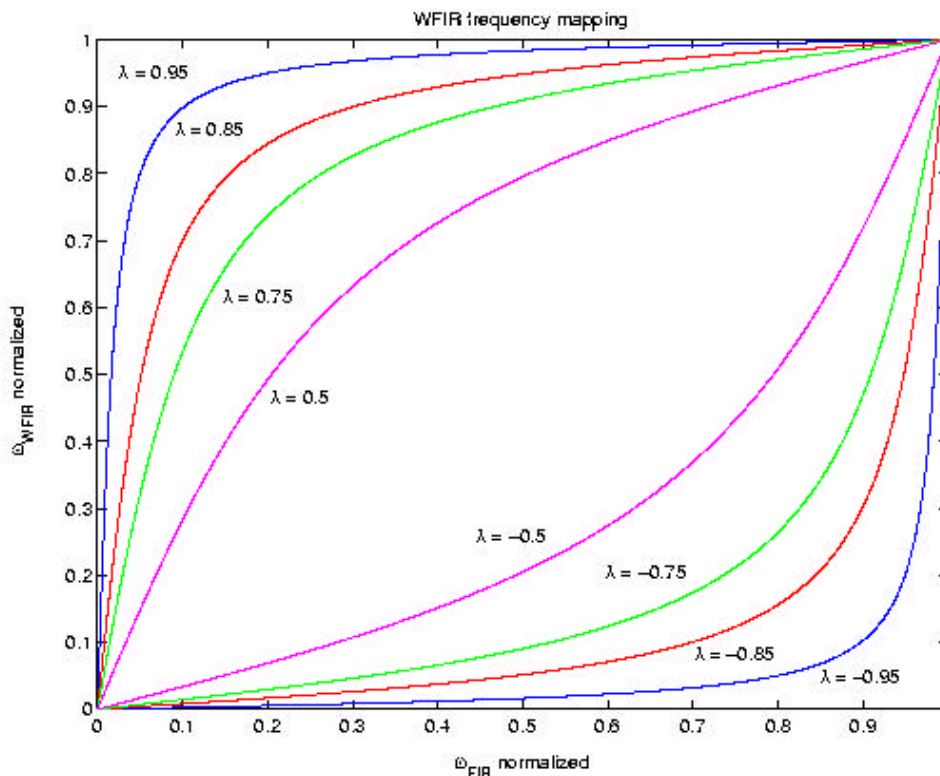
Il modulo qui presentato è tuttora in corso di evoluzione, in quanto stanno per venire introdotti altri nuovi parametri, idonei a descrivere la "spazialità" del suono. Fra essi sono compresi la Correlazione Mutua Inter Aurale, IACC, che può essere calcolata a partire da misurazioni eseguite con testa artificiale, e le frazioni di energia laterale (Lateral Efficiency, Lateral Fraction), che invece possono essere ottenute da misurazioni effettuate con il microfono Soundfield.

### Nuovo modulo di filtraggio "warpato" (WFIR)

E' stato realizzato un ulteriore "Plug-in" per CoolEdit, che implementa l'algoritmo di filtraggio warpato (WFIR). Si tratta sostanzialmente di un tradizionale FIR, in cui alle celle di ritardo unitario vengono sostituiti dei filtri All-Pass aventi la seguente funzione di trasferimento:

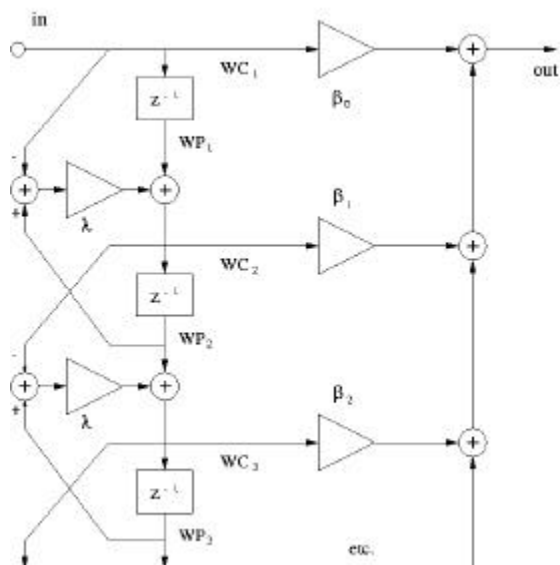
$$D_1(z) = \frac{z^{-1} + \alpha}{1 + \alpha z^{-1}}$$

Operando sul parametro  $\lambda$ , è possibile far sì che il filtraggio porti ad una deformazione (warping) dell'asse delle frequenze, come mostrato dalla seguente figura:



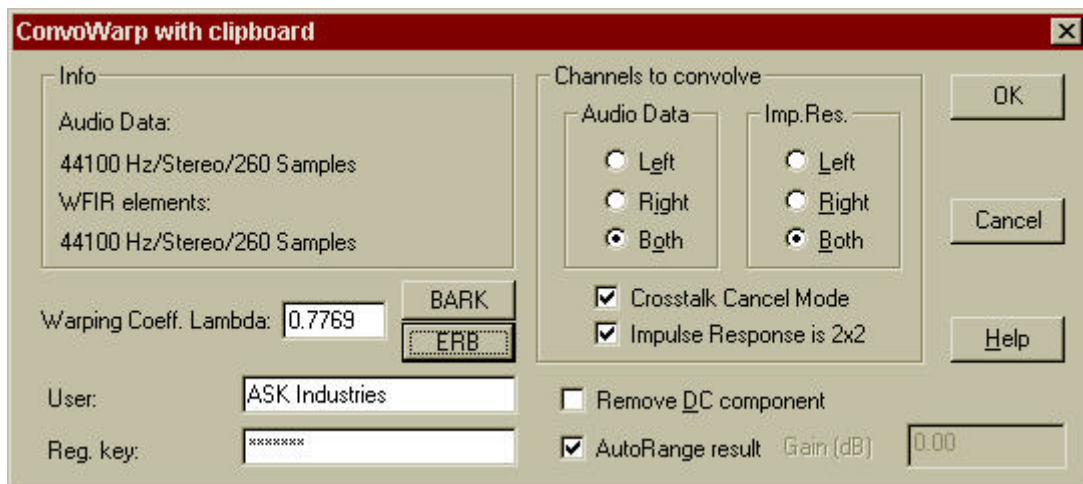
In questo modo è possibile avere un filtraggio più aderente al meccanismo uditivo umano, che come è noto presenta una risoluzione elevata ed abbastanza lineare alle basse frequenze, mentre poi a frequenze medie ed alte la risoluzione diminuisce, diventando pressochè logaritmica. Operando nel dominio dei segnali campionati, il valore ottimo di  $\lambda$  si situa attorno a 0.8, allorchè la frequenza di campionamento è fissata in 48 kHz.

L'algoritmo di filtraggio warped consente normalmente di ottenere un effetto psicoacustico molto più marcato con un basso numero di "taps" (coefficienti), e risulta quindi particolarmente idoneo per l'implementazione su DSP di basso costo. Tale implementazione in tempo reale è possibile utilizzando il seguente diagramma di flusso:



Parallelamente all'implementazione sulla piattaforma DSP (SHARC 21065L), è stato altresì sviluppato un modulo software per PC che implementa lo stesso algoritmo, e che rende possibile l'emulazione del filtraggio DSP senza bisogno di procedere ogni volta alla ricompilazione del codice ed al trasferimento dello stesso sulla schedina di sviluppo.

La seguente figura mostra l'interfaccia grafica del nuovo modulo:



Il modulo consente anche l'effettuazione delle operazioni di cross-talk cancellation, utili per il filtraggio dei segnali binaurali in fase di riproduzione su una coppia di altoparlanti nella configurazione "Stereo Dipole", come ampiamente riportato in [15].

Dai test soggettivi effettuati, è emerso che il filtraggio "warpato" presenta significativi vantaggi rispetto al tradizionale filtraggio FIR, risultando più "naturale" e morbido, e contemporaneamente garantendo una più efficace equalizzazione della risposta alle basse frequenze.

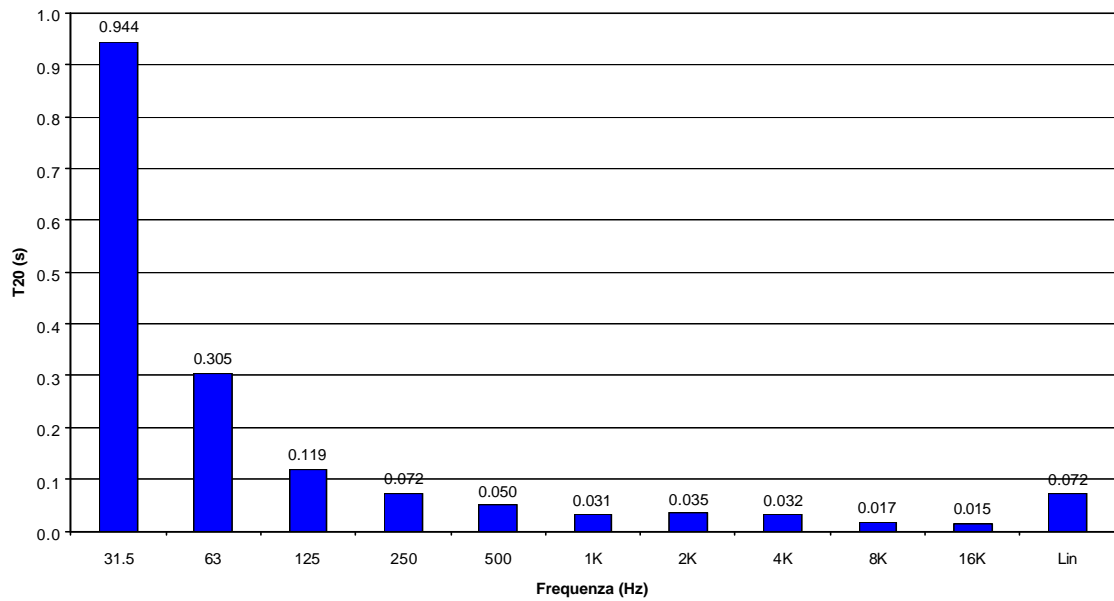
### Valutazione sperimentale delle prestazioni acustiche delle sale prove

Facendo impiego del nuovo modulo per il calcolo dei parametri acustici in ambienti confinati, è stato possibile effettuare una serie di misure di caratterizzazione del comportamento acustico delle sale prove esistenti all'ASK. In particolare è stata effettuata la qualificazione acustica delle seguenti sale:

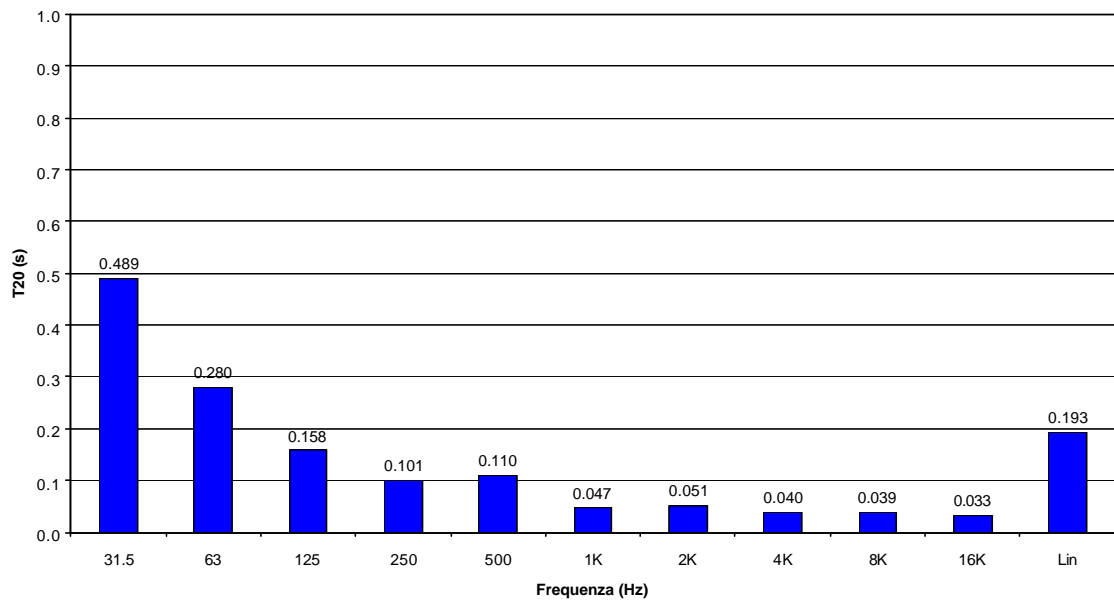
- Camera anecoica "vecchia"
- Cameretta anecoica nuova, palazzina principale
- Cameretta anecoica nuova, prove qualità
- Sala di ascolto

Le prove sono consistite nella misurazione di un congruo numero di risposte all'impulso, mediante la metodica MLS, facendo impiego di un sistema di altoparlanti autoamplificato a larga banda (AudioLink AL105) e di un microfono da misura Bruel & Kjaer. Dalle risposte all'impulso sono stati ottenuti, mediante il modulo software già descritto, i valori dei principali descrittori acustici. In particolare, sono stati realizzati i grafici del tempo di riverbero T20, che vengono qui riportati.

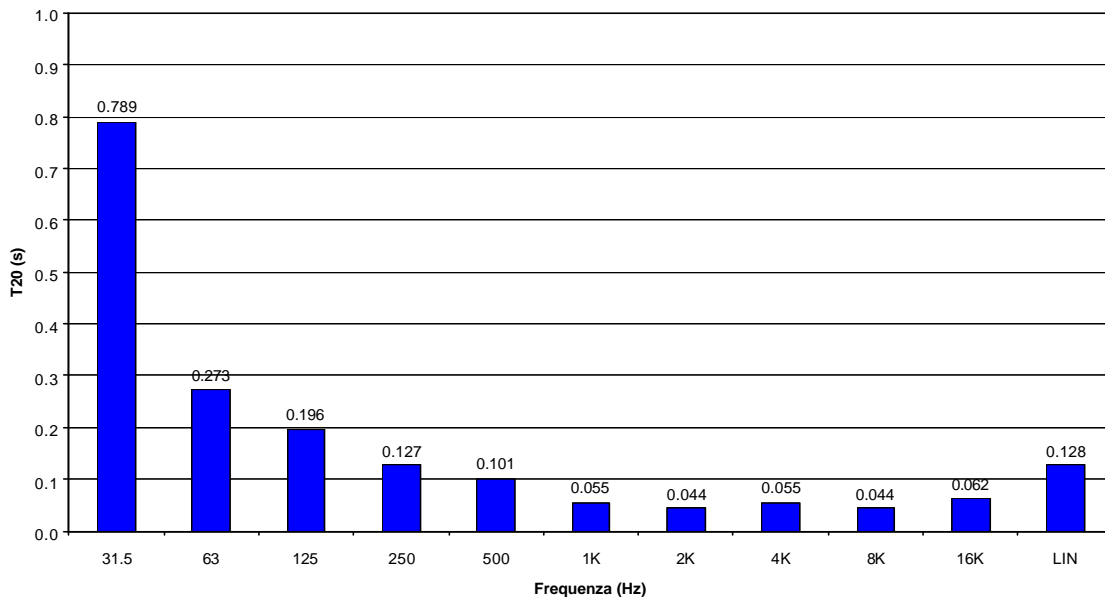
Tempo di Riverbero Cam. anecoica ASK



Tempo di Riverbero Nuova Cam. Anecoica ASK

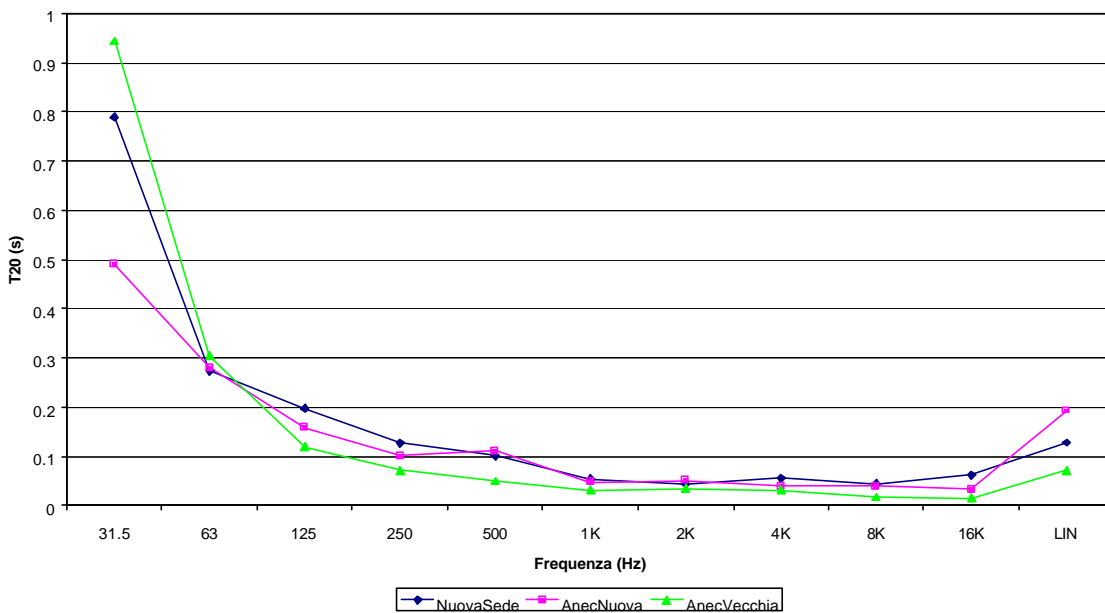


Tempo di Riverbero Cam. Anecoica Pr. Qualità - Nuova Sede - ASK



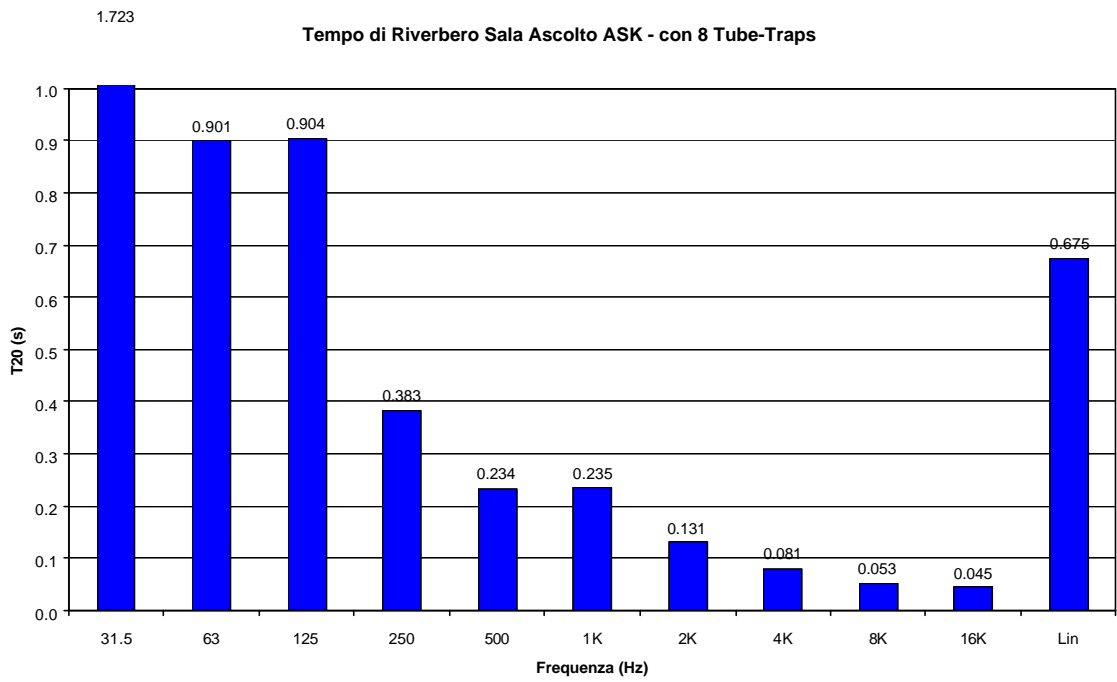
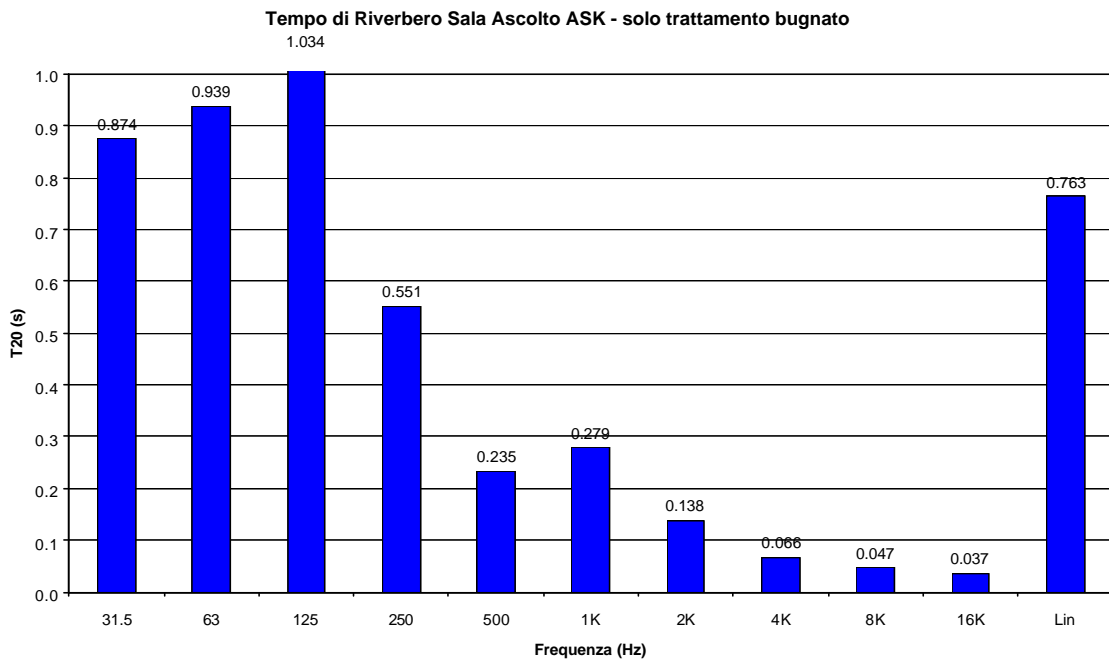
Il seguente grafico pone a confronto i tempi di riverbero misurati nelle tre camere anecoiche:

Confronto Tempi Riverbero Camere Anecoiche ASK

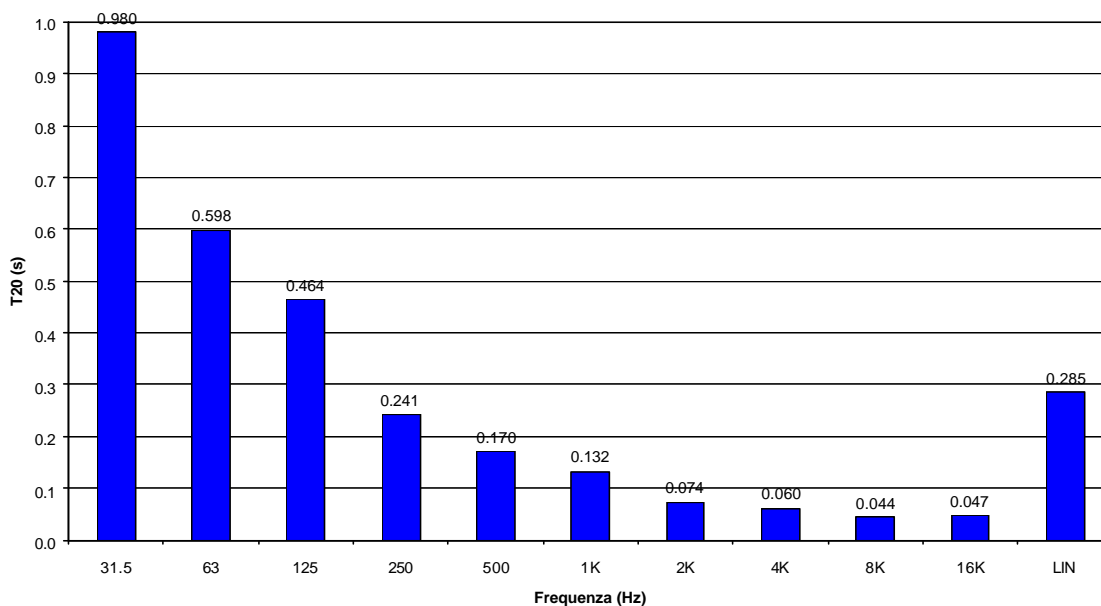


Nella saletta di ascolto, le misure sono state ripetute più volte, al crescere del trattamento fonoassorbente installato nel locale. Viene qui riportata la serie completa di misure, da cui si evidenzia l'evoluzione nel tempo delle prestazioni acustiche della sala d'ascolto.

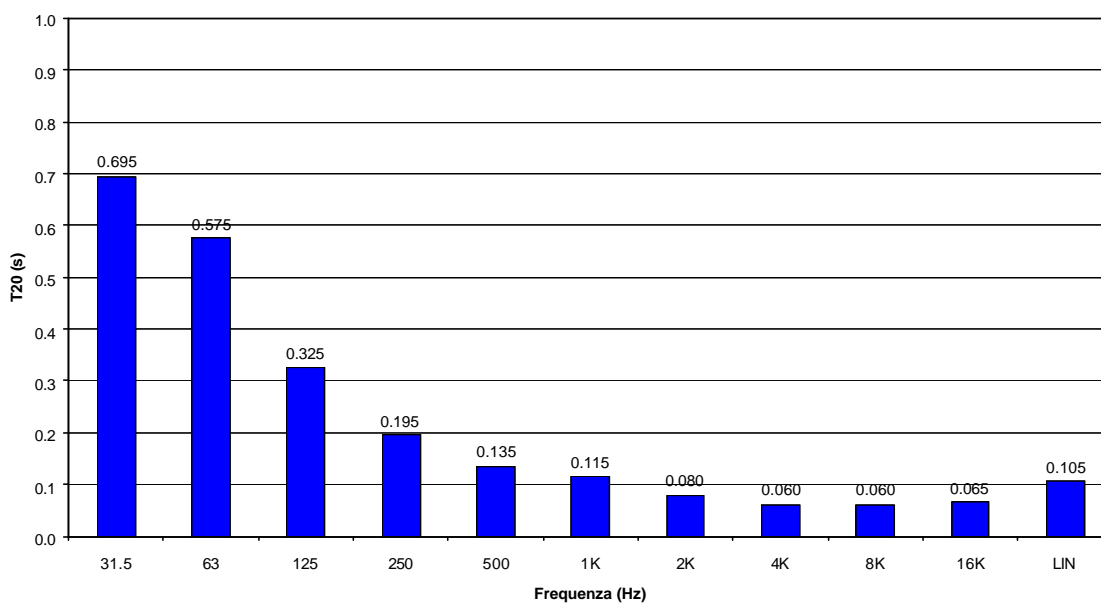




Tempo di Riverbero Sala Ascolto ASK - con 16 Tubi e quadretti Fiberform



Tempo di Riverbero Sala Ascolto ASK - con Tubi, Fiberform e Pedana e poster



Infine la seguente figura pone a confronto le 4 serie di dati.

Dall'esame dei risultati sperimentali ottenuti si conclude che:

- La camera anecoica vecchia è risultata migliore delle due camere nuove, che sono più piccole e comunque rivestite con materiale melamminico a piramidi, di prestazioni decisamente inferiori rispetto ai cunei in poliuretano espanso della vecchia camera anecoica; soprattutto a bassa frequenza.
- La camera d'ascolto era all'inizio in condizioni veramente sfortunate, in quanto il rivestimento bugnato in schiuma melamminica presentava un assorbimento inefficace alle basse frequenze, ed esagerato sopra i 2 kHz.

- I successivi interventi realizzati nella saletta d'ascolto, consistenti nell'introduzione di assorbitori tubolari, di pannelli vibranti in Fiberform e della pedana di legno listellato foderata in Fiberform, hanno portati a consistente e progressivo miglioramento delle condizioni acustiche: resterebbe la necessità di far risalire ulteriormente un poco il riverbero ad alta frequenza, cosa che richiederebbe l'installazione di altri 4/5 poster con rivestimento plastico trasparente da appendere alle pareti.

Rimane comunque sul tappeto l'opportunità di realizzare una "vera" camera anecoica, possibilmente impiegando gli spazi adiacenti ai nuovi laboratori qualità, oppure un futuro ampliamento della sede ASK. Solo una camera anecoica di dimensioni generose, e dotata di cunei di lunghezza superiore al metro, potrebbe infatti consentire di ottenere un campo acustico assolutamente privo di riflessioni anche alle frequenze più basse.

Si auspica pertanto che questa sia una delle direzioni in cui ASK indirizzi i propri futuri investimenti, possibilmente ricercando e realizzando l'opportunità di ottenere un cofinanziamento da parte del MURST nell'ambito del Piano Nazionale di Ricerca o dei Fondi per Ricerca Applicata.

## Conclusioni

I risultati sin qui conseguiti hanno riguardato tutti i punti del programma di ricerca originario. In alcuni casi, come mostrato, le ipotesi originarie sono state ridimensionate dai risultati della sperimentazione, in particolare non è stata individuata una semplice correlazione fra risultati delle misurazioni e giudizi soggettivi. Questo non deve tuttavia essere considerato un fallimento, ma è stato invece lo stimolo allo sviluppo di due nuove metodiche (AQT per la valutazione oggettiva delle misurazioni, IPA per la valutazione soggettiva dei test di ascolto), che si prevede di sviluppare ulteriormente nel corso del 2001, onde "aggirare" le problematiche emerse nell'utilizzo dei parametri misurabili e dei risultati soggettivi tradizionali.

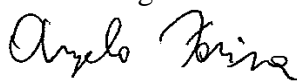
L'unica nota dolente riguarda l'erogazione delle due borse di studio previste già nel corso del primo anno, che avrebbero dovuto dar luogo ad una intensa attività di sviluppo software su piattaforma DSP di basso costo: una inenarrabile sequenza di disguidi burocratico/amministrativi hanno fatto sì che la prima borsa sia stata fruita (da parte dell'ing. Enrico Armelloni, che già aveva proficuamente svolto il suo lavoro di tesi presso ASK) nel corso dell'estate dell'anno 2000, mentre la seconda è ancora da assegnare.

I risultati scientifici conseguiti hanno consentito di raggiungere i vertici mondiali della ricerca nel settore della riproduzione elettroacustica, come testimoniato dalle pubblicazioni effettuate nel corso del 1999 ad importanti convegni internazionali [1-6]. Nel corso dell'anno 2000 sono stati pubblicati numerosi altri articoli [7-17], che testimoniano la continuità della produzione scientifica.

Reggio Emilia, 7 dicembre 2000

Il responsabile scientifico della ricerca

Prof. Angelo Farina



---

## Bibliografia

- [1] A. Farina, E. Ugolotti – “Subjective comparison between Stereo Dipole and 3D Ambisonic surround systems for automotive applications” – AES 16<sup>th</sup> International conference on Spatial Sound Reproduction – Rovaniemi, 9-12 April 1999.
- [2] G. Cibelli, A. Bellini, E. Ugolotti, A. Farina, C. Morandi - "Experimental validation of loudspeaker equalization inside car cockpits" - 106th AES Convention, Munich, 8-11 may 1999.
- [3] O.Kirkeby, P.A. Nelson, P. Rubak, A. Farina - "Design of Cross-talk Cancellation Networks by using Fast Deconvolution" - 106th AES Convention, Munich, 8-11 may 1999.
- [4] Ole Kirkeby, Per Rubak, Angelo Farina - "Analysis of ill-conditioning of multi-channel deconvolution problems" - 1999 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics - Mohonk Mountain House New Paltz, New York October 17-20, 1999
- [5] Bellini, G. Cibelli, E. Ugolotti, A. Farina, C. Morandi - "Non-linear digital audio processor for dedicated loudspeaker systems" - Proc. of International IEEE Conference on Consumer Electronics, Los Angeles, June 1998.
- [6] A. Bellini, A. Cannizzaro, E. Ugolotti, A. Farina, C. Morandi - "Experimental validation of stereo dipole systems inside car cockpits" - International Conference on Signal Processing Applications and Technology (ICSPAT 99), Orlando, Florida, November 1-4, 1999.
- [7] A. Farina - "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique" - 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [8] A. Farina - "Introducing the surface diffusion and edge scattering in a pyramid-tracing numerical model for room acoustics" - 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [9] A. Farina, M. Zanolin, E. Crema - "Measurement of sound scattering properties of diffusing panels through the Wave Field Synthesis approach" - 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000.
- [10] A. Farina - "Validation of the numerical simulation of the scattered sound field with a geometrical pyramid tracing approach" - ACOUSTICS 2000 - IOA Conference, Liverpool (GB) 17-18 April 2000.
- [11] A.Farina - "Validation of the Pyramid Tracing algorithm for sound prediction outdoors: comparison with experimental measurements and with the ISO/DIS 9613 standards" - Invited Paper on Advances in Engineering Software, ISSN 0965-9978, vol. 31/4, pp. 241-250, Elsevier Applied Science, April 2000.
- [12] A. Farina, P. Fausti - "Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment" - Journal of Sound and Vibration, vol.232, no. 1, April 2000, ISSN 0022-460X, pp. 213-229.
- [13] A. Bellini, E.Armelloni, E. Ugolotti, G. Cibelli, A. Farina - "Experimental validation of warping filters inside car cockpits" - Proc. of International IEEE Conference on Consumer Electronics, Los Angeles, June 2000.
- [14] L. Tronchin, A. Farina, M. Pontillo, V. Tarabusi - "Binaural hearing and its numerical representation with an Eulerian approach" - Seventh International Congress On Sound And Vibration ICSV7 - Garmisch-Partenkirchen GERMANY July 4-7, 2000.
- [15] A. Farina, A. Bellini, E. Armelloni - "Implementation of cross-talk canceling filters with warped structures - Subjective evaluation of the loudspeaker reproduction of stereo recordings" - Proc. of SHARC2000, Boston, 11-13 September 2000.
- [16] A. Bellini, E. Ugolotti, G. Cibelli, A. Farina, C. Morandi, G. Gobbi - "APLODSP, design of customizable Audio Processor for LOudspeaker system compensation by DSP" - 109th AES Audio Convention, Los Angeles, 18-22 September 2000.
- [17] A. Bellini, E. Armelloni, G. Cibelli, E. Ugolotti, A. Farina - "Experimental validation of equalizing filter for car cockpits designed with Warping technique" - 109th AES Audio Convention, Los Angeles, 18-22 September 2000.