

ALLESTIMENTO DI UNA SALA D'ASCOLTO DI PICCOLE DIMENSIONI

Andrea Cammi (1)(2), Paolo Martignon (3), Andrea Capra (1)(3), Angelo Farina (1)(3)

- 1) Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Parma.
- 2) StudioAcustica, via Venturi 101/a – 42021 Bibbiano (RE)
- 3) LAE, laboratorio di Acustica ed Elettroacustica, 43100 Parma (PR)

1. Sommario

Per un ascolto ottimale della musica in una sala di piccole dimensioni occorre un accurato trattamento acustico passivo ed un buon impianto di riproduzione: l'allestimento della stanza d'ascolto ubicata presso la Casa Della Musica di Parma ha permesso di studiare e sperimentare soluzioni che dessero all'ascoltatore un buon comfort acustico unitamente ad una riproduzione sonora fedele e realistica.

Per ovviare alle ridotte e non ottimali dimensioni della sala, pensata per scopi di ricerca elettroacustica e psicoacustica mediante tecniche di auralizzazione e ascolto surround, è stato progettato ed ottimizzato il trattamento acustico passivo con particolare attenzione alle risonanze presenti in bassa frequenza. A questo scopo sono stati impiegati risonatori di Helmholtz opportunamente accordati, diffusori, assorbitori ed una controsoffittatura sviluppata ad hoc. Sono stati implementati ed ottimizzati sistemi di riproduzione spazializzata quali Stereodipolo, Ambisonics e Surround 7.1 affinché l'ascoltatore possa effettuare un diretto confronto tra le diverse tecniche, valutandone così pregi e difetti.

2. La sala d'ascolto

Nel 2004 l'istituzione Casa Della Musica di Parma ha stipulato una convenzione con il Dipartimento di Ingegneria Industriale concedendo due stanze della propria sede per scopi di ricerca elettroacustica e psicoacustica. In particolare uno dei due ambienti è dedicato all'allestimento di una sala d'ascolto in grado di implementare un vasto numero di sistemi di riproduzione, con particolare interesse alle tecniche d'auralizzazione, ovvero la "simulazione percettiva" di campi sonori noti, su base fisica e/o psicoacustica.

In prima approssimazione l'ambiente può essere considerato un parallelepipedo di dimensioni 455x300x425 cm; in realtà due pareti non risultano perfettamente parallele e la sala presenta una lieve asimmetria, come mostrato in figura 1.

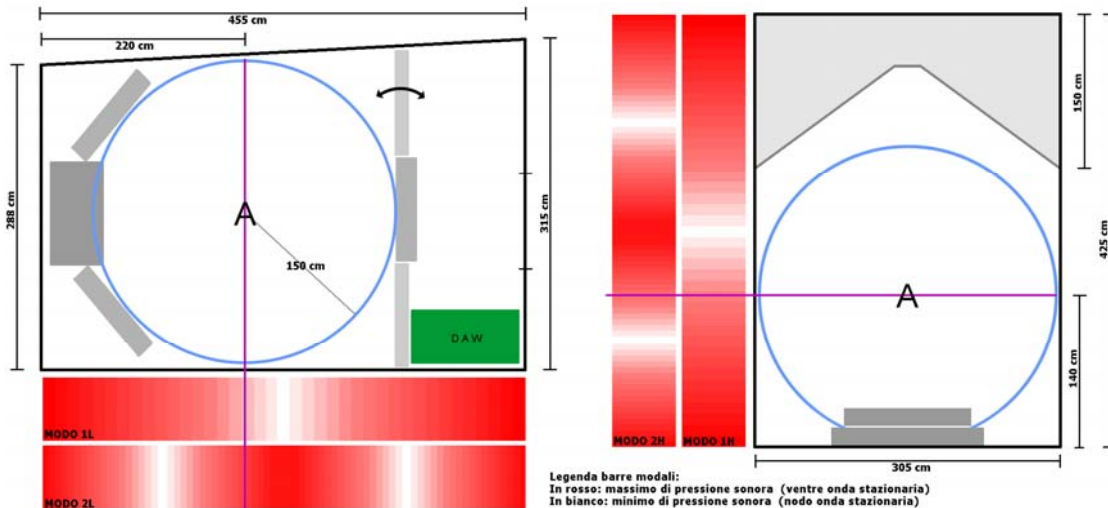


Figura 1 - Pianta della stanza, evidenziando punto d'ascolto scelto (A) in funzione dei primi modi assiali nelle coordinate L, W.

2.1 Scelta della posizione d'ascolto

La stanza, considerate le applicazioni e comunque le ridotte dimensioni complessive, può ospitare un unico ascoltatore, accomodato su di una sedia posta sopra una pedana rialzata. Il punto d'ascolto (in figura 1 indicato con la lettera A) è stato scelto garantendo una superficie sferica utile di raggio 150cm attorno all'ascoltatore, sulla quale sono installati gli altoparlanti dei vari sistemi di riproduzione (che verranno trattati in seguito).

La posizione prestabilita tiene conto della distribuzione del campo sonoro nelle basse frequenze ed è collocata in una posizione intermedia, dove nodi e ventri delle onde stazionarie proprie della sala sono tenuti il più possibile lontani. Figura 1 spiega graficamente quanto appena esposto.

2.2 Trattamento Acustico

L'acustica passiva rappresenta il primo passo per ottenere un ambiente di riproduzione affidabile ed il più possibile neutro. In questa sede verranno trattate le soluzioni adottate nella sala per contrastare le risonanze naturali sulle basse frequenze.

Si procede attraverso un'analisi teorica modale, supponendo in prima approssimazione l'ambiente parallelepipedo. Lo studio modale evidenzia le principali problematiche della stanza in oggetto: come conseguenza delle piccole dimensioni, i modi dei primi ordini cadono nelle frequenze udibili, questi quindi saranno eccitati dal campo sonoro irradiato dalle sorgenti e sono in grado di conservare per un lungo tempo l'energia. Si generano quindi marcati fenomeni di riverberazione per alcune frequenze ed in generale una conformazione spaziale del campo sonoro tutt'altro che omogenea [1][2][3].

Tabella 1 – Prime risonanze assiali di un ambiente parallelepipedo di 455x300x425 cm. N_l N_h N_w esprimono l'ordine del modo nelle tre coordinate lunghezza, altezza e profondità; f_n la frequenza di risonanza naturale

Ordine nelle 3 coordinate			Frequenza naturale	Ordine nelle 3 coordinate			Frequenza naturale	Ordine nelle 3 coordinate			Frequenza naturale
N_l	N_h	N_w	f_n (Hz)	N_l	N_h	N_w	f_n (Hz)	N_l	N_h	N_w	f_n (Hz)
1	0	0	37.80	2	0	0	75.6	3	0	0	113.41
0	1	0	40.47	0	2	0	80.94	0	3	0	121.41
0	0	1	57.33	0	0	2	114.67	0	0	3	172.00

La presenza di due dimensioni molto simili (altezza e lunghezza) comportano una geometria non ottimale dal punto di vista acustico, queste infatti determinano una distribuzione delle frequenze naturali dell'ambiente particolarmente sfortunata: prima fra tutte va segnalata la presenza di due risonanze intorno ai 40Hz. Si è optato per trattamenti acustici mirati alle basse frequenze (trattati nei prossimi paragrafi), in grado di far fronte alle problematiche appena esposte.

2.3 Controsoffitto in Fiberform

Il primo trattamento acustico qui descritto consiste in una controsoffittatura di pannelli dallo spessore di 6cm in Fiberform, materiale poroso formato da fibre di poliestere. Il materiale sfruttato, se collocato direttamente sulle pareti, conta di un coefficiente d'assorbimento α pressoché costante a partire dai 500Hz, ed estende l'azione fonoassorbente sulle basse frequenze se installato a distanza dalle superfici rigide perimetrali. Nella particolare configurazione mostrata in figura 2 è stato possibile:

- I. creare una cavità (il volume d'aria interno, dai pannelli alla superficie rigida esterna di muratura) dalle massime dimensioni permesse nella stanza
- II. un trattamento fonoassorbente a larga banda considerata la distanza variabile dalla superficie rigida esterna, capace di coprire anche le basse frequenze
- III. si è cercato di modificare le geometrie dell'ambiente, principali responsabili nella creazione delle risonanze naturali [1].

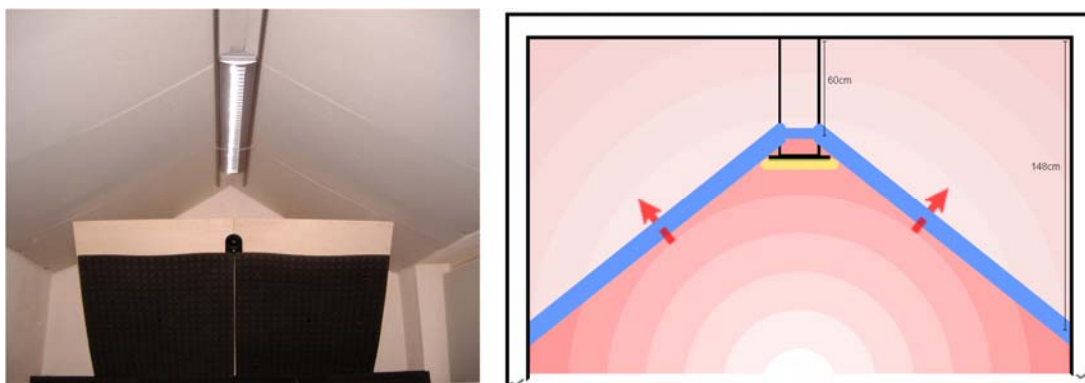


Figura 2 – Controsoffitto/Trappola per bassi in Fiberform

2.4 Risuonatori di Helmholtz

Per contrastare il primo modo assiale longitudinale si è optato per una schiera di Risuonatori di Helmholtz. L'elemento base è un volume d'aria delimitato da pareti rigide e collegato all'esterno da un'apertura detta "collo". Il suono incidente fa vibrare l'aria contenuta nel collo del risuonatore, che si comporta come una massa vibrante collegata a una molla costituita dall'aria contenuta nella cavità. Tale risuonatore è in grado di dissipare energia acustica in calore, per effetto dell'attrito viscoso che si verifica a causa delle oscillazioni dell'aria contenuta nel collo, in corrispondenza della frequenza fondamentale di risonanza del sistema massa-molla appena descritto [2][3].

Le cavità sono state ricavate da contenitori di plastica rigida da 18.9 litri; per adattare meglio la frequenza d'azione si è aggiunto un sottile strato di moquette nella parte interna del collo, di lunghezza e spessore variabile fino ad ottenere l'accoppiamento con il modo longitudinale, raggiungendo la frequenza centrale di circa 38Hz ed una adeguata dispersione (si confronti Tabella 1).

La parte sinistra di Figura 3 mostra l'analisi spettrale estratta durante le fasi di accordatura [1], la curva piena in blu rappresenta la configurazione scelta, dove inoltre è stato aggiunto del materiale poroso all'interno della cavità, al fine di attenuare i massimi secondari caratteristici dei contenitori, dovuti da onde stazionarie interne alla cavità. L'aggiunta di materiale fonoassorbente nel volume interno ha permesso di ottenere un trattamento acustico pressoché trasparente alle medie frequenze, allargando inoltre ulteriormente la campana di risonanza.

Una schiera dei Risuonatori di Helmholtz descritti è stata installata nel fondo della sala d'ascolto, posizione ottimale, in corrispondenza del massimo di pressione sonora alla frequenza di 37.8Hz, conseguente al modo longitudinale che si vuole attenuare (Figura 3 al centro).

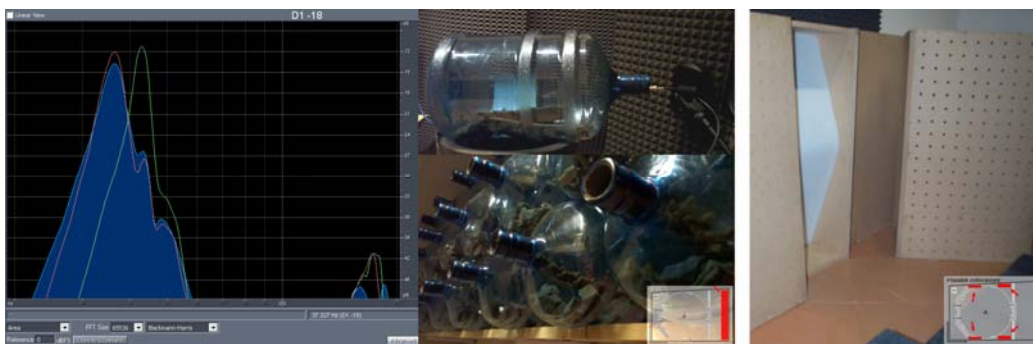


Figura 3 - A Sinistra: paragone FFT risuonatori nelle differenti configurazioni durante accordatura; Al centro fasi di accordatura risuonatori (in alto) ed assetto finale (sotto); A destra: pannelli forati, evidenziata la posizione scelta.

La parte destra di Figura 3 mostra i pannelli forati, anche questo trattamento si basa su di una cavità risonante ed è l'estensione del risuonatore di Helmholtz. Ogni foro corrisponde ad un collo avente la sua area superficiale e una lunghezza determinata dallo spessore del pannello, ed il volume d'aria retrostante è in comune per tutti i risuonatori. In presenza di più fori la mutua iterazione tra essi determina la comparsa di fenomeni dissipativi a frequenze diverse dalla frequenza di risonanza, ottenendo uno

spettro d'assorbimento più ampio rispetto a quello che si ottiene con risuonatori singoli [2][3]. Questi fenomeni, unitamente all'effetto dei materiali porosi inseriti all'interno della cavità (lana di roccia e Fiberform), hanno permesso di realizzare pannelli fonoassorbenti che assorbono una banda estesa approssimativamente dai 100 ai 300Hz. Una stima della frequenza fondamentale del trattamento descritto è stata ottenuta dalla formula:

$$(1) \quad f_0 = \frac{c_0}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{d \cdot (l + r\pi/2)}} \quad [\text{Hz}]$$

dove: c_0 è la velocità di propagazione del suono nel mezzo [m/s]; P è la percentuale di foratura del pannello; d è lo spessore interno della cavità parallelepipedica; r il raggio del foro (per tener conto del fattore correttivo di bocca); l lo spessore del pannello, ovvero la lunghezza del collo.

Tabella 2 – Specifiche di dimensionamento pannelli forati.

Spessore cavità (mm, interno)	Volume Cavità (m cubi)	Spessore pannello (lunghezza collo)	Diametro fori (mm)	Passo fori (mm)	Percentuale foratura	Frequenza di risonanza
220	0.106	18	10	50	2.50%	114.8
140	0.067	18	5	35	1.33%	113.9

2.5 Risultati della bonifica acustica

Per ogni fase intermedia si sono acquisite le risposte all'impulso dell'ambiente, nel punto d'ascolto scelto, tramite la tecnica della sinesweep logaritmica: si riproduce un tono sinusoidale crescente in frequenza nel tempo, contemporaneamente si registra mediante microfono omnidirezionale, infine in post-processing viene effettuata una convoluzione con il segnale inverso, ottenendo la risposta impulsiva cercata, da intendere come descrittore acustico dell'ambiente [1][4].

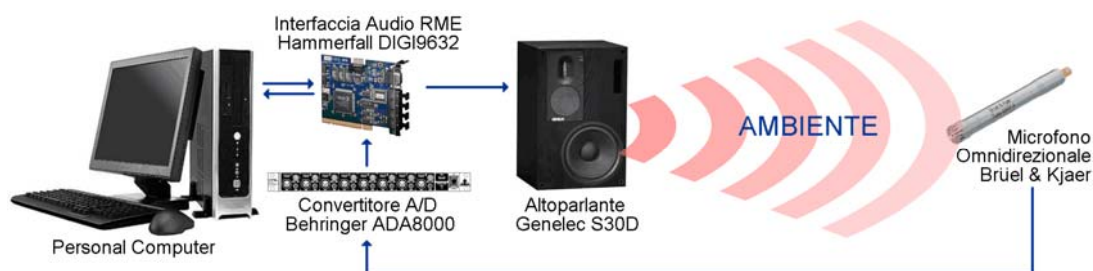


Figura 4 – Routing e strumentazione adottata, con relativo schema di acquisizione misure, tramite tecnica sinesweep logaritmica.

Analizzando le risposte all'impulso, ottenute mediante software Adobe Audition e Plug-in Aurora [6][7], si ottiene un confronto oggettivo prima/dopo l'azione dei vari

trattamenti acustici installati. Si procede con l'analisi spettrale, sfruttando il software Spectralab [13].

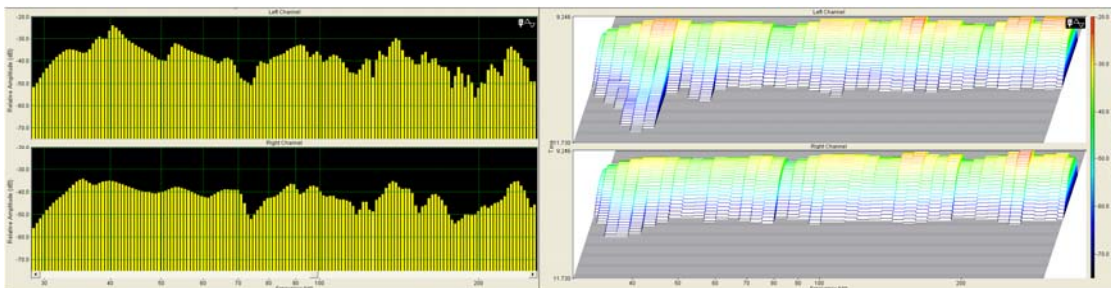


Figura 5 – Analisi spettrale, stazionaria (a sinistra) e mediante grafico waterfall (a destra).

Figura 5 mostra un confronto fra il precedente allestimento ante operam, descritto nella parte alta dei grafici, e dopo l'azione dei trattamenti acustici installati, in basso. Nell'insieme la conformazione del campo sonoro risulta molto più omogenea alle basse frequenze, le prime risonanze intorno ai 40Hz ora presentano un massimo attenuato di oltre 15dB, ed un andamento in tutta la regione modale più morbido, come effetto dello smorzamento attuato dai trattamenti acustici (parte sinistra di Figura 5). Le lunghe code riverberanti, generate dall'energia accumulata per effetto delle onde stazionarie, si sono ridotte per oltre il 25% (parte destra di Figura 5).

Parallelamente si è condotta un'analisi mediante Audio Quality Test (AQT) [5][8], basato su "burst" monotonali a frequenze crescenti ben precise con intervalli stretti a piacere, più adatta per l'analisi di transitori, tipici dei segnali musicali. Essa permette una risoluzione spettrale maggiore alle basse frequenze (più vicina alle capacità del sistema uditivo) e considera anche fenomeni psicoacustici, in particolare il mascheramento acustico e l'effetto Haas. AQT fornisce due parametri: il Bilanciamento Tonale, e l'Articolazione; il secondo esprime la dinamica sonora ottenibile all'interno di un ambiente. Figura 6 mostra in forma sintetica l'esito del paragone mediante test AQT. Come si vede l'Articolazione è mediamente migliorata, soprattutto nella prima ottava e nelle medio-basse frequenze. E' invece diminuita, seppure marginalmente, l'articolazione nell'intorno degli 80Hz, difatti non sono stati collocati nella sala trattamenti efficaci per contrastare i modi 2L e 2H, onde stazionarie che degradano la dinamica del suono nel punto d'ascolto, prossimo ai nodi di pressione sonora relativi alle risonanze appena menzionate.

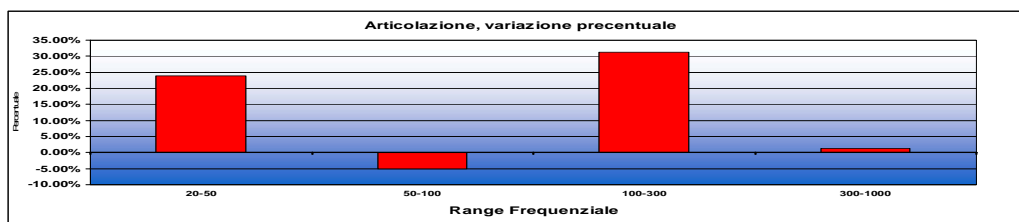


Figura 6 - Variazione percentuale del parametro AQT "Articolazione", dopo l'installazione dei trattamenti acustici

3. Tecniche di spazializzazione

La sala d'ascolto qui descritta deve permettere la fruizione di diversi sistemi di riascolto, per riuscire a confrontarne timbrica e resa spaziale. Per questo motivo tutto il sistema elettroacustico è stato pensato per consentire la riproduzione audio tramite stereo normale, stereo dipolo, sistemi surround standard (5.1, 6.1, 7.1) e sistemi ambisonic [9].

La presenza di questi sistemi consente di effettuare test d'ascolto al fine di valutarne l'efficacia in termini di spazializzazione, di localizzazione e percezione di distanza, di piacevolezza all'ascolto; scopo finale della ricerca è quello di individuare il miglior sistema audio atto a riprodurre brani auralizzati con le risposte all'impulso di teatri e sale da concerto. E' infatti solo tramite un confronto diretto e simultaneo che è possibile valutare l'acustica di diverse sale per poi trovare una possibile correlazione tra la piacevolezza d'ascolto e i parametri oggettivi propri dell'ambiente in esame [10].

3.1 Surround

E' importante poter comparare i sistemi surround avanzati con ciò che l'utente comune ha a disposizione in materia di surround. Ecco perchè la sala è attrezzata per la visione di DVD con contenuti audio da riprodurre in sistemi Home Theater (ascolti in 5.1 o in 6.1).

3.2 Stereo Dipolo

Lo scopo dello stereodipolo è quello di ricreare, partendo da registrazioni binaurali, il corretto segnale sonoro alle orecchie dell'ascoltatore, quella stessa pressione che si avrebbe se si fosse realmente presenti all'evento sonoro. Per ottenere ciò si passa attraverso un sistema di due casse acustiche, ognuna pilotata con una versione processata delle originali registrazioni binaurali, utilizzando la tecnica della "cancellazione di cross-talk" [10].

Questa tecnica (Figura 7) utilizza una matrice 2x2 di filtri calcolati in modo che il sistema cancelli il suono che dalla cassa sinistra arriverebbe all'orecchio destro e viceversa, eliminando così il cammino incrociato. Per la sua realizzazione si sono utilizzati due monitor Genelec S30D, posti frontalmente all'ascoltatore, a circa 10° di apertura.

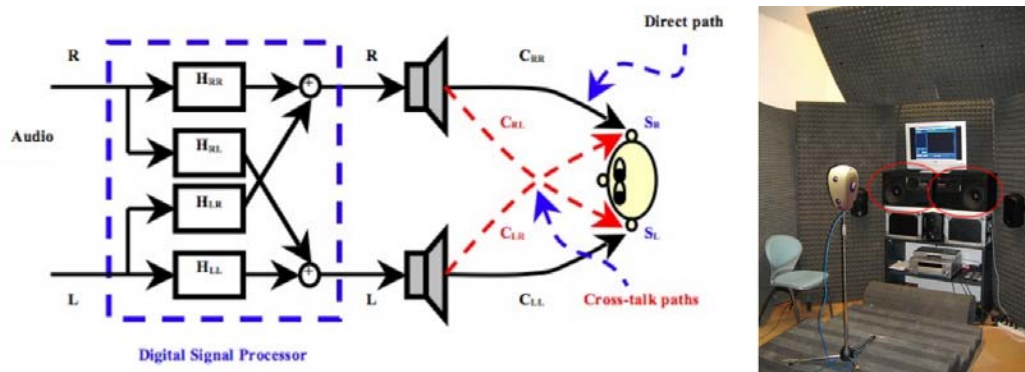


Figura 7 – A sinistra: schema di principio e matrice dei filtri per Stereo Dipolo; a destra: foto della sala durante le fasi di implementazione dei filtri.

3.3 Ambisonic

Tale sistema si basa sulla scomposizione del campo sonoro in armoniche sferiche, teoria sviluppata da Gerzon negli anni '70, e consente, partendo da un ben determinato campionamento spaziale, la ricostruzione del campo sonoro campionato tramite un array di altoparlanti [11].

Il sistema implementato nella sala d'ascolto in questione è formato da 7 casse Turbosound Impact 50, disposte attorno all'ascoltatore ad un'altezza di circa 1.50m dal pavimento. Questa configurazione permette di arrivare con buoni risultati ad un secondo ordine Ambisonic, attualmente limitato al solo piano LW (Figura 8 a sinistra).

La sala è predisposta per l'upgrade al sistema Ambisonic 3D, installando ulteriori 8 satelliti: 4 di questi a pavimento, i restanti sospesi sopra il punto d'ascolto, come mostrato in Figura 8 (a destra).



Figura 8 – A sinistra: Layout planare Ambisonic, evidenziando sorgenti (in blu); a destra: Layout 3D previsto per sviluppi futuri.

3.4 Hardware

Il cuore del sistema è un computer Asus S-presso (Pentium IV, 2GHz): il suo sistema di raffreddamento incide marginalmente, mantenendo basso il rumore di fondo della stanza. E' equipaggiato con una scheda audio RME Hammerfall DIGI9652 che tramite ADAT e SPDIF porta il segnale in formato digitale a casse e convertitori secondo lo schema in Fig.9.

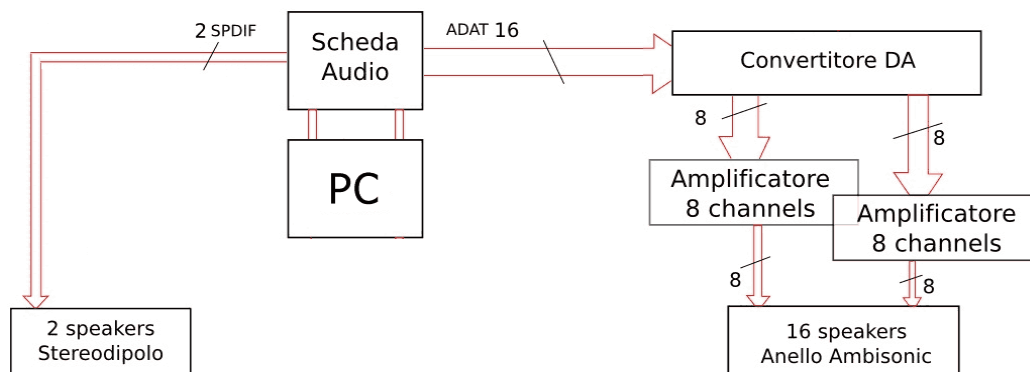


Figura 9 – Routing Hardware.

Le due casse utilizzate per lo Stereodipolo, due Genelec S30D, sono collegate tramite connessione SPDIF (digitale); la conversione del segnale in analogico avviene direttamente nelle due casse senza bisogno di alcun convertitore.

I segnali da fornire agli speaker dell'array Ambisonic viaggiano lungo cavi ottici in formato ADAT. Per passare da segnale digitale a segnale analogico si utilizza un convertitore Apogee 16DA a 16 canali, 96KHz 24 bit. I segnali analogici forniti dal convertitore vengono indirizzati ai due amplificatori QSC CX168 ad 8 canali, i quali pilotano le casse dell'intero sistema.

3.5 Software

L'implementazione della stereo dipolo avviene in ambiente Windows tramite l'host Audiomulch, unitamente al convolutore Voxengo. La traccia audio binaurale viene suonata da un player e convoluta in tempo reale con i filtri di cancellazione caricati in Voxengo.

L'implementazione del sistema Ambisonic avviene in ambiente Linux (fedora) attraverso l'Ambisonic Decoder sviluppato da Fons Adriaensen. Come player multicanale viene utilizzato Ardour, connesso al decoder tramite il cablaggio virtuale offerto dal software Jack.

4. Conclusioni

Il trattamento passivo installato nella sala d'ascolto ha permesso un sostanziale miglioramento: l'acustica dell'ambiente risulta adeguata per le applicazioni previste ed è stato raggiunto un certo controllo sulle basse frequenze. Le risposte all'impulso relative all'ambiente nel punto d'ascolto per ogni step intermedio costituiscono una solida base di dati, fruibile nelle future scelte progettuali, atte al perfezionamento dell'acustica nella sala d'ascolto.

In un futuro molto prossimo sarà possibile la coesistenza di un sistema Ambisonics 3D (16 speakers) con un sistema Doppio Stereo Dipolo con speakers di rinforzo per il suono laterale e superiore. Ciò comporterà l'aumento del numero di canali disponibili tramite l'aggiunta di un amplificatore e di un convertitore. I due sistemi funzioneranno in contemporanea tramite un unico sistema operativo (Linux).

Una sala di questo tipo si presterà all'effettuazione di test d'ascolto, sia per la comparazione di sistemi di riproduzione audio surround differenti, sia per il confronto diretto dell'acustica di sale destinate alla musica.

5. Bibliografia

- [1] Cammi A., “Progetto e sviluppo di una sala d’ascolto di piccole dimensioni”, tesi di laurea anno accademico 2005-06, Università degli Studi di Parma, Facoltà di Ingegneria.
- [2] Cigolani S., Spagnolo R., “Acustica musicale e Architettonica”, UTET Libreria (2001).
- [3] Kuttruff H., “Room acoustics”, Fourth edition (1996).
- [4] Farina A., “L’acustica dei piccoli ambienti d’ascolto”, AES Italian Section, Milano (2001)
- [5] Farina A., Cibelli G., Bellini A., “AQT – A new objective measurement of the Acoustical Quality of sound reproduction in small compartments”, AES Amsterdam (2001)
- [6] Software Adobe Audition, <http://www.adobe.com>
- [7] Farina A., “Aurora”, modulo Plug-in per Adobe Audition
- [8] Azzali A., “AQT Analysis”, modulo Plug-in per Adobe Audition
- [9] Martignon P., Azzali A., Cabrera D., Capra A., Farina A., “Reproduction of auditorium spatial impression with binaural and stereophonic sound systems”, 118th AES Convention, Barcellona, 28-31 May 2005
- [10] Farina A., Martignon P., Capra A., “Listening test performed inside a virtual room acoustic simulator”, I Seminario Música Ciência e Tecnologia Acustica Musical, Sao Paulo do Brasil, 3-5-Novembre 2004
- [11] Jerome Daniel, Rozenn Nicol, Sebastien Mreau, “Further investigation of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for holophonic sound imaging”, 114th AES Convention, Amsterdam, 22-25 March 2003
- [12] Software Ambisonic Decoder, <http://www.kokkinizita.net/linuxaudio/>
- [13] Software Spectralab, <http://www.soundtechnology.com/>