



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA"  
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI  
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Tesi di Laurea in Fisica

CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA  
IN RISOLUZIONE SPAZIALE  
DELLA SALA SANTA CECILIA  
DELL'AUDITORIUM PARCO DELLA MUSICA IN  
ROMA

ANNO ACCADEMICO 2004-2005

Laureando:  
**Gianfrancesco Araneo**  
Matr: 692770

Relatore:  
**Prof. Andrea Frova**  
Relatore esterno:  
**Prof. Angelo Farina**

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Parametri dell'acustica architettonica</b>	<b>5</b>
2.1	Risposta all'impulso e integrale di Schroeder . . . . .	5
2.2	La riverberazione . . . . .	8
2.3	La caratterizzazione delle sale secondo Beranek . . . . .	12
2.4	Correlazione tra intensità e chiarezza . . . . .	14
2.5	Livello di intensità sonora e parametro G . . . . .	15
2.6	La sensazione di spazialità e i suoi caratteri descrittivi . . . . .	16
2.7	Intelligibilità del segnale: indici STI e RASTI . . . . .	20
2.8	Rapporto tra valutazioni soggettive e parametri oggettivi . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Auditorium Parco della Musica</b>	<b>25</b>
3.1	Caratteristiche del complesso . . . . .	25
3.2	La sala Santa Cecilia . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Tecniche di misurazione e simulazione al calcolatore</b>	<b>31</b>
4.1	Cenni di teoria dei segnali . . . . .	31
4.2	Tecniche di misura . . . . .	34
4.2.1	Segnale impulsivo . . . . .	34
4.2.2	Segnale MLS . . . . .	34
4.2.3	Segnale di <i>swept sine</i> . . . . .	36
4.3	Strumentazione utilizzata . . . . .	44
4.3.1	Sorgenti . . . . .	44
4.3.2	Rilevatori . . . . .	47
4.3.3	Scheda audio . . . . .	50
4.3.4	Amplificatore . . . . .	50
4.3.5	Software di misurazione e di acquisizione dei dati . . . . .	50
4.4	Modelli al calcolatore del campo sonoro . . . . .	53
4.4.1	Introduzione . . . . .	53
4.4.2	Modelli statistici: il campo semiriverberante . . . . .	54

4.4.3	Il metodo delle Sorgenti Immagine . . . . .	55
4.4.4	<i>Ray Tracing</i> . . . . .	57
4.4.5	Evoluzioni del <i>Ray Tracing</i> . . . . .	59
4.4.6	<i>Pyramid Tracing</i> . . . . .	63
4.4.7	Il programma <i>Ramsete</i> . . . . .	72
4.5	L'auralizzazione . . . . .	74
<b>5</b>	<b>Risultati e confronti</b>	<b>77</b>
5.1	Le misurazioni . . . . .	77
5.2	Risultati delle misurazioni con piatto rotante . . . . .	80
5.2.1	Tempi di riverberazione . . . . .	80
5.2.2	Parametri di chiarezza e tempo baricentrico . . . . .	85
5.2.3	Parametro G . . . . .	88
5.2.4	Parametri di spazialità . . . . .	90
5.3	Risultati delle misurazioni col registratore <i>DAT</i> . . . . .	99
5.3.1	Tempi di riverberazione . . . . .	100
5.3.2	Parametri di chiarezza e tempo baricentrico . . . . .	105
5.3.3	Parametro G . . . . .	113
5.3.4	Parametro di spazialità IACC . . . . .	113
5.4	Il modello digitale . . . . .	118
5.5	Risultati delle simulazioni e confronti con le misurazioni . . . . .	119
5.5.1	Tempi di riverberazione . . . . .	119
5.5.2	Parametri di chiarezza e tempo baricentrico . . . . .	125
5.5.3	Parametro G . . . . .	130
5.6	Utilizzo del modello . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>133</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>135</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

L'importanza dell'acustica architettonica ha avuto slancio negli ultimi anni per l'esigenza della costruzione di *auditori* sempre più capienti e più capaci di dare la medesima emozione visiva-uditiva alla totalità degli spettatori, indipendentemente dalla posizione da loro occupata all'interno della sala. Le caratteristiche riconosciute a una buona sala da concerto non sono univoche e dipendono da una grande quantità di variabili. Innanzitutto il luogo della rappresentazione deve avere la funzione di cassa armonica per i musicisti, vibrare alle frequenze della trama musicale e far pervenire all'ascoltatore il messaggio che il compositore voleva trasmettere. In realtà anche questo ambiente ideale di "perfetta realizzazione" dipende dal gusto soggettivo che, oltre ad avere *a priori* una forte variabilità da persona a persona, è stato comunque plasmato nel corso del tempo dall'evoluzione del contesto culturale. L'acustica architettonica ha appunto questa duplice funzione: quella di misurare in una sala da concerto già costruita dei parametri che tentino di quantificare delle sensazioni sonore, come ad esempio quanto un suono è "caldo", "ricco", etc. ; e quella di imparare dalle esperienze costruttive precedenti per progettare sale che soddisfino le richieste acustiche di musicisti e pubblico.

Lo scopo di questa tesi è investigare le caratteristiche della sala Santa Cecilia del nuovo Auditorium Parco della Musica in Roma, progettato da Renzo Piano con la consulenza acustica dello studio di ingegneria Müller BBM di Monaco di Baviera, al fine di valutarne i pregi ed eventualmente localizzare difetti acustici. Il lavoro è consistito in una serie di misure *in loco* per mezzo di apparecchiature elettroacustiche allo scopo di ottenere parametri valutativi in risoluzione spaziale, e la costruzione di un modello disegnato in CAD<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Autodesk AutoCAD: Software di progettazione architettonica.

usato per ottenere una simulazione al calcolatore della propagazione acustica all'interno della sala compatibile con i dati sperimentali acquisiti.

### Schema del lavoro

La presente tesi è divisa in 5 capitoli, così organizzati:

- il capitolo 2 delinea i parametri propri dell'acustica architettonica, tra cui quelli legati alla riverberazione (integrale di Schroeder e tempi di riverberazione), quelli legati alla chiarezza e all'intelligibilità del segnale (indici di chiarezza, tempo baricentrico e parametri STI e RASTI), quelli legati alla spazialità (LF, IACC, etc.) e infine il parametro legato alla potenza sonora (G). Conclude il capitolo un breve paragrafo dedicato al rapporto tra i parametri e le sensazioni sonore soggettive;
- il capitolo 3 offre una rapida panoramica del complesso Parco della Musica ed in particolare della sala Santa Cecilia, oggetto di studio della tesi. Il capitolo è corredato di fotografie per aiutare nella visualizzazione dei luoghi descritti;
- il capitolo 4 si divide in due parti, di cui la prima contenente una descrizione delle tecniche proprie delle misurazioni dell'acustica architettonica (cenni di teoria dei segnali, modalità di misurazione e strumentazione utilizzata), e una seconda parte che espone i modelli del campo sonoro in ambiente chiuso, e in particolare i metodi numerici propri delle simulazioni al calcolatore. Ampio spazio è dedicato alla descrizione del modello del *Pyramid Tracing* e al programma *Ramsete*, utilizzato in questa tesi di laurea;
- il capitolo 5 presenta tutti i risultati ottenuti con le misurazioni nella sala e con la simulazione numerica, confrontandoli ed analizzandoli; sono mostrati gli andamenti di quasi tutti i parametri descritti nel capitolo 2. A corredo delle descrizioni sono presentati grafici e mappe che rendono più agevole la comprensione dei dati;
- infine, il capitolo 6 mostra le conclusioni e suggerisce eventuali sviluppi futuri.

## Capitolo 2

# Parametri dell'acustica architettonica

I parametri dell'acustica architettonica sono stati creati nel corso del secolo passato per soddisfare l'esigenza di una quantificazione ragionata della percezione uditiva di emissioni acustiche prodotte in ambienti chiusi, come ad esempio la coda sonora che si manifesta in un edificio molto grande costruito con materiali litoidei come una chiesa. In questo capitolo si parlerà innanzitutto della risposta all'impulso e dell'integrale di Schroeder per il calcolo del tempo di riverberazione, della riverberazione in generale, e della definizione dei parametri dell'acustica architettonica: quelli legati alla dipendenza temporale della risposta all'intensità del segnale sonoro e quelli che definiscono la sensazione di spazialità all'interno delle sale da concerto. Infine si accennerà brevemente ai parametri relativi all'intelligibilità del parlato e alla correlazione tra dati oggettivi e giudizi soggettivi di una sala da concerto.

### 2.1 Risposta all'impulso e integrale di Schroeder

La risposta all'impulso  $h(t)$  è la rappresentazione nel tempo della funzione di trasferimento di un sistema lineare e che non varia nel tempo (nel seguito definito come *tempo-invariante*). Nella fattispecie in essa è contenuta tutta l'informazione della trasformazione che la sala (sottostante a determinate condizioni) opera sulla sollecitazione, ed è quindi l'obiettivo di una misurazione di acustica ambientale. Schematizzando la sala come una scatola nera, dove all'ingresso si ha la sollecitazione  $x(t)$ , l'uscita  $y(t)$  risulterà dall'integrale di convoluzione:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau. \quad (2.1)$$

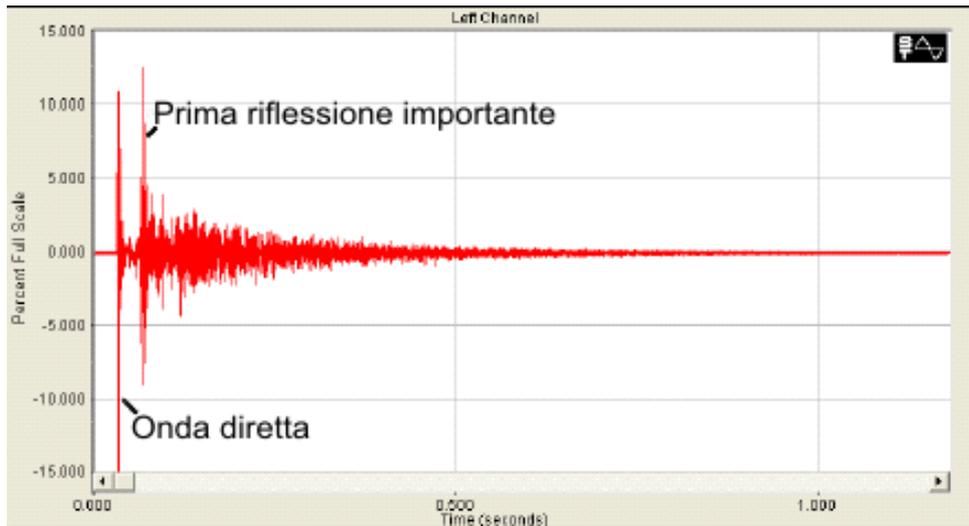


Figura 2.1: Andamento temporale di una risposta all'impulso sperimentale.

C'è una distinzione tra la risposta all'impulso teorica e quella misurata dai microfoni. Quest'ultima è una misura della pressione e non dell'intensità della perturbazione sonora, che sarà invece ottenibile elevando al quadrato la risposta all'impulso in pressione: da questa operazione si ottiene il *riflettogramma*. Schroeder per primo studiò il legame tra la risposta all'impulso teorica e il reflectogramma [1]; egli dimostrò che la media temporale  $\langle n^2(\tau) \rangle$  di un gran numero di profili di decadimento sperimentali  $n^2(\tau)$  è legata alla risposta all'impulso teorica  $h^2(\tau)$  dalla relazione:

$$\langle n^2(\tau) \rangle = \int_{\tau}^{\infty} h^2(t)dt = \int_0^{\infty} h^2(t)dt - \int_0^{\tau} h^2(t)dt. \quad (2.2)$$

In Fig.2.2 è rappresentata l'integrazione di Schroeder; la ricostruzione della curva di decadimento può avvenire mediante l'integrazione all'indietro della risposta all'impulso elevata al quadrato (curva A) fino a raggiungere il livello di energia stazionario, oppure, procedendo per tempi crescenti, per sottrazione dal livello di energia stazionario calcolato a parte, dei valori assunti progressivamente dall'integrale della risposta all'impulso quadrata (curva B). La scelta del tempo di integrazione è importante in quanto il rumore di fondo

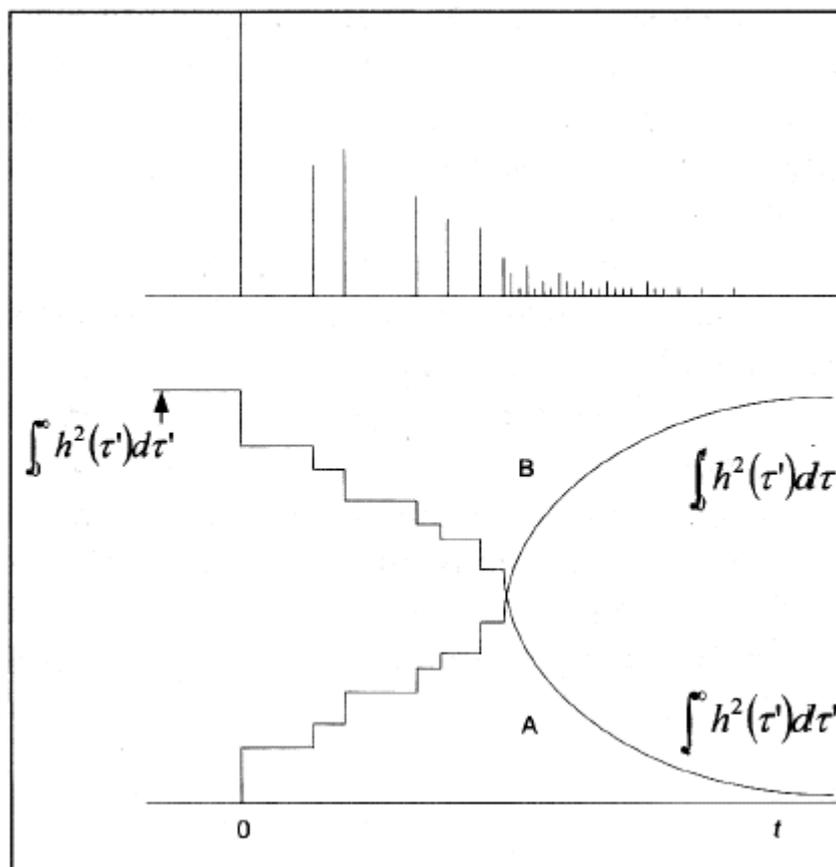


Figura 2.2: Ricostruzione della curva di decadimento tramite integrazione all'indietro.

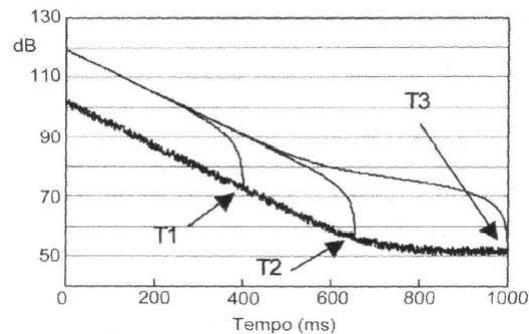


Figura 2.3: Effetto della scelta del tempo sull'integrazione di Schröder.

integrato ha una pendenza sì lineare ma non orizzontale e ciò influisce sulla determinazione della pendenza della curva di Schroeder come osservabile in fig.2.3, dove si rileva che il valore ottimale del tempo di integrazione è  $T_2$ , in quanto in  $T_3$  si incorpora troppo rumore di fondo mentre in  $T_1$  la curva di decadimento non è ancora esaurita. A tale scopo sono stati sviluppati degli algoritmi che tagliano la doppia pendenza tipica del rumore di fondo, correggendone la curva [2].(Fig.2.4)

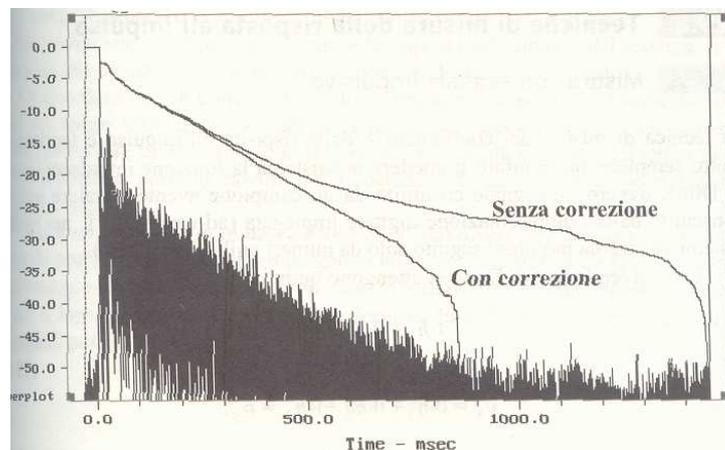


Figura 2.4: Effetto dell'algoritmo di correzione sulla curva di decadimento

## 2.2 La riverberazione

La riverberazione è l'attributo più evidente che si percepisce in un ambiente chiuso. Esso è dovuto al fatto che anche un suono molto breve, e al limite anche una  $\delta$ -Dirac, arriva all'ascoltatore sia come onda diretta che come on-

da riflessa. Ciò si manifesta chiaramente nella registrazione di una risposta all'impulso, in cui sono ben visibili il contributo del suono diretto e delle prime riflessioni, registrati come stimoli separati, mentre quello delle riflessioni più deboli appare come un continuo. Il primo a cercare di dare una veste

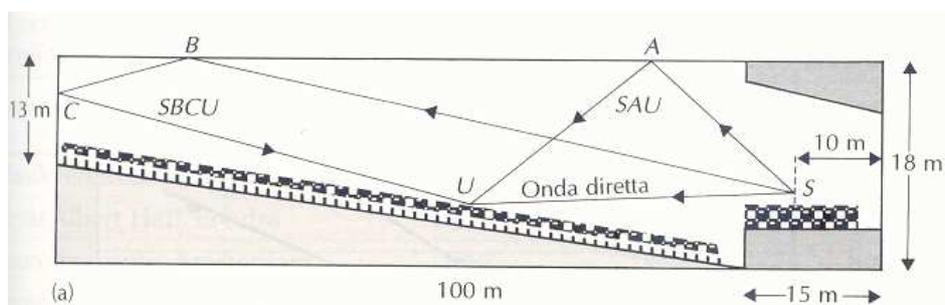


Figura 2.5: Riflessioni dell'onda sonora.

quantitativa al fenomeno della riverberazione acustica fu W.C.Sabine, che con metodi statistici (per la cui derivazione si rimanda alla letteratura [3]) produsse la formula:

$$T_R = 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \left( \frac{343}{c} \right), \quad (2.3)$$

dove viene definito  $T_R$  come tempo di riverberazione, ovvero il tempo necessario affinché il livello dell'intensità sonora, dopo lo spegnimento di una sorgente stazionaria, decada di 60 dB. Nella formula,  $c$  è la velocità del suono nel mezzo,  $V$  è il volume della sala,  $S$  è l'area totale delle superfici che delimitano l'ambiente e  $\bar{\alpha}$  è il coefficiente di assorbimento acustico medio dell'ambiente:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i, \quad (2.4)$$

dove  $\alpha_i$  sono i coefficienti di assorbimento delle singole superfici della sala e  $S_i$  sono le aree delle superfici stesse. Si può osservare nella tabella 2.1 la dipendenza dal volume del  $T_R$  in diverse sale da concerto; la schematizzazione di Sabine che porta alla formula 2.3 riguarda però il caso particolare di campo sonoro perfettamente diffuso il cui decadimento sonoro in scala logaritmica è pressoché una retta con pendenza negativa. In realtà ciò che si verifica in una sala da concerto è un decadimento che presenta pendenze doppie o multiple, con concavità di vario tipo e per questo la schematizzazione di Sabine è solo una forte approssimazione; tuttavia la formula che porta il suo nome è ancora oggi usata per la semplicità della stima del tempo di riverberazione e per una discreta affidabilità sotto certe condizioni [4]. Una evidente incongruenza della formula si riscontra ad esempio attribuendo ad

$\bar{\alpha}$  valore 1, che corrisponde ad una perfetta assorbimento delle pareti (camera anecoica ideale). In tal caso si avrebbe soltanto il suono diretto, e quindi con  $T_R = 0$ , contrariamente a quanto si ottiene dalla formula 2.3. Una correzione alla formula è stata apportata da R.F. Norris e C.F. Eyring:

$$T_R = 0,161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \left( \frac{343}{c} \right). \quad (2.5)$$

La formula 2.5 risolve l'incongruenza precedentemente descritta, in quanto  $T_R \rightarrow 0$  per  $\bar{\alpha} \rightarrow 1$ ; inoltre  $\ln(1 - \bar{\alpha}) \rightarrow \bar{\alpha}$  per valori piccoli di  $\bar{\alpha}$ , e quindi la formula 2.5 si riduce sostanzialmente alla formula di Sabine.

Per motivi tecnici nella misura del tempo di riverberazione non si considera mai il tempo di decadimento tra 0 e -60 dB, per evitare che il suono diretto e prime riflessioni troppo intense ne forniscano una misura distorta e poiché è difficilmente ottenibile un rapporto impulso-rumore di fondo di 60 dB, ma si usa l'interpolazione tra -5 e -35 dB oppure tra -5 e -25 dB (misure previste dalla norma ISO 3382-1997). Questi tempi sono noti come  $T_{20}$  e  $T_{30}$  (Fig.2.6). Tutti questi parametri, come anche quelli che seguiranno, possono essere calcolati dalla risposta all'impulso in bande d'ottava. Si otterrà dunque un valore del parametro per ogni banda di frequenze, la cui frequenza centrale raddoppia nel passare da una banda all'altra.

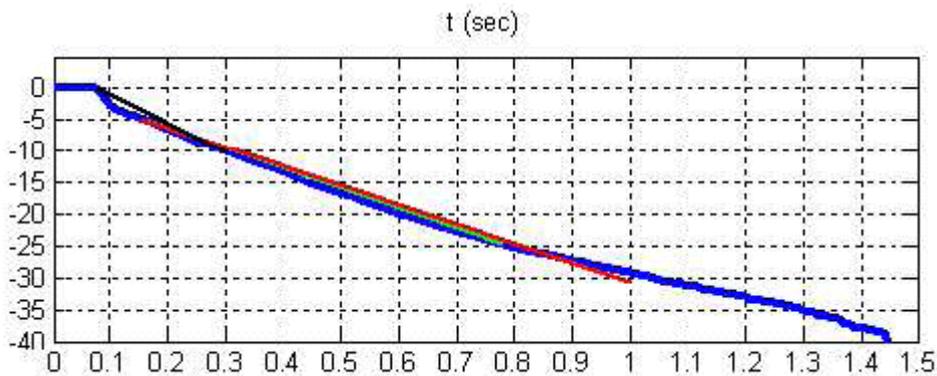


Figura 2.6: Integrale di Schroeder dell'intensità con le curve corrispondenti a  $T_{20}$  (in verde),  $T_{30}$  (in rosso) e EDT (in nero; vedi paragrafo seguente).

Nome della sala	Volume in $m^3$	$T_R$ in s
Amsterdam, Music Theater	10000	1,30
Berlin, Deutscheoper	10800	1,36
Berlin, Komischeoper	7000	1,25
Budapest, Erkel Theater	17000	1,30
Budapest, Staatsoper	8900	1,34
Buenos Aires, Teatro Colòn	20570	1,56
Chicago, Civic Opera House	23000	1,51
Dresden, Semperoper	12480	1,60
Essen, Opera House	8800	1,61
Hamburg, Staatsoper	11000	1,23
London, Royal Opera House	12250	1,20
Milano, Teatro alla Scala	11252	1,24
Londra, Queen's Hall	11945	1,70
New York, Metropolitan Opera	24724	1,47
Paris, Opera Garnier	10000	1,18
Prague, Staatsoper	8000	1,23
Rochester, Eastman Theater	23970	1,63
Salzburg, Festspielhaus	14020	1,50
Seattle, Opera House	22000	2,02
Tokio, Bunka Kaikan	16250	1,51
Tokio, Nuovo Teatro Nazionale	14500	1,49
Tokio, Teatro Nissei	7500	1,11
Vienna, Staatsoper	10665	1,36
Washington, JFK Center, Opera House	13027	1,28

Tabella 2.1: Tempi di riverberazione di alcune tra le più note sale operistiche; i tempi sono ottenuti mediando i risultati ottenuti con un numero di rilevatori variabile dalle 10 alle 24 posizioni. I tempi sono stati misurati a sale piene e il valore qui presentato è la media tra i tempi di riverberazione alle medie frequenze (tra i 500 e i 2 KHz) [5]

## 2.3 La caratterizzazione delle sale secondo Beranek

Il primo tentativo di studiare le sensazioni soggettive delle sale da concerto allo scopo di classificarne la qualità fu intrapreso da Leo Beranek [6]. Egli infatti, dopo aver studiato le caratteristiche geometriche e la natura delle superfici componenti 54 sale da concerto preesistenti, sottopose a un gran numero di musicisti e critici musicali dettagliati questionari di valutazione di alcune sensazioni di cui alcune sono riportate:

- **Vivezza:** è fortemente correlata al tempo di riverberazione  $T_R$  e dovrà essere adeguata al genere musicale.
- **Pienezza:** è correlata al rapporto tra l'intensità del suono riflesso e quella del suono diretto: se tale rapporto cresce, il suono è più pieno, come si addice per esempio alle orchestre che eseguono la grande musica romantica. Necessita di un  $T_R$  lungo.
- **Chiarezza:** è complementare alla pienezza. È importantissima per il parlato e assume un ruolo di rilievo anche in brani musicali con piccolo indice di autocorrelazione (pezzi veloci). In una sala destinata a più usi occorre cercare un buon compromesso tra pienezza e chiarezza. Richiede un  $T_R$  da cortissimo (parlato) a medio-corto (musica preromantica).
- **Intimità:** esprime il senso spaziale di vicinanza tra gli esecutori e l'ascoltatore e dipende dall'intervallo temporale tra suono diretto e il primo suono riflesso.
- **Calore:** dipende dal rapporto dei tempi di riverberazione dei bassi e degli alti. Per un buon calore un buon rapporto tra il  $T_R$  a 50 Hz e a 500 Hz è pari a 1,5.
- **Brillantezza:** comporta un suono freddo e limpido ed è in un certo senso complementare al calore. Il rapporto tra  $T_R$  degli alti e  $T_R$  dei bassi deve avvicinarsi a 1.
- **Trama:** dipende dal modo in cui le prime riflessioni (quelle che di fatto non si percepiscono distinte dal suono diretto) arrivano all'ascoltatore. È importante che arrivino almeno 5 suoni riflessi entro una sessantina di ms dal suono diretto. Assolutamente da evitare sono echi e forme di focalizzazione del suono tipici di alcuni teatri ad esempio a forma di ferro di cavallo.

- **Fusione:** è importante che il suono degli esecutori arrivi ben fuso agli ascoltatori. Ciò si ottiene riflettendo il suono con apposite superfici attorno agli esecutori.
- **Effetto d'insieme:** è una caratteristica che va a beneficio degli orchestrali e consiste in una buona compattezza del campo sonoro che giunge agli esecutori stessi. Devono dunque essere evitati problemi di dissincronia tra le varie sorgenti di suono limitando le dimensioni del palcoscenico.
- **Rumore di fondo:** deve essere tenuto il più basso possibile.

A queste caratteristiche soggettive vengono messe in relazione dei parametri oggettivi come il tempo di riverberazione e soprattutto l'*Initial Time Delay Gap* (ITDG), ovvero il tempo di ritardo tra il suono diretto e la prima forte riflessione, a cui venne data un'importanza fondamentale nonostante il fatto che fu calcolata da Beranek a tavolino con la tecnica della riflessione dei raggi sonori su superficie speculare; l'ITDG secondo Beranek stesso risulta fortemente correlato con la qualità acustica della sala, al contrario del tempo di riverberazione, per il quale è richiesto semplicemente che rientri in un certo intervallo dipendente dal genere musicale (circa 2 s per una sala da concerto, intorno a 1.5 s per una sala d'opera, etc..). Il lavoro di Beranek, seppur mancante di rigosità in alcune sue parti, è stato comunque molto importante tra le altre cose per lo sviluppo di teorie sulla bontà delle prime riflessioni. Ad esempio secondo Cremer [7] sono determinanti le prime riflessioni che provengono dalle pareti, riflessioni che devono essere temporalmente molto ravvicinate al suono diretto allo scopo di rafforzarlo e di dargli nitidezza, in quanto risultano all'orecchio integrate tra di loro; risultano fortemente negative singole riflessioni importanti oltre i 100 ms, che giungono all'ascoltatore sotto forma di sgradevoli echi che disturbano la chiarezza. La difficoltà nella determinazione dell'ITDG consiste nel fatto che distinguere il contributo delle riflessioni non è facile neanche in una risposta all'impulso quadrata (ad esempio in fig.2.1 la prima riflessione è evidente, ma in altri casi non lo è); ciò che oggi si misura è il cosiddetto "EDT" (*Early Decay Time*), il tempo di decadimento iniziale proposto da Jordan [8]. Questo rappresenta il tempo di riverberazione associato alle prime riflessioni che sono quelle che si accorpano al suono diretto rendendolo più vivo e si ottiene interpolando i primi 10 dB del decadimento sonoro. Altri parametri storici introdotti da Beranek e ancora oggi occasionalmente usati sono il tempo di riverberazione alle medie frequenze ( $T_{med}$ ) e il rapporto dei bassi (*Bass Ratio* o BR) definiti come:

$$T_{med} = \frac{T_{60}(500Hz) + T_{60}(1KHz)}{2} s \quad (2.6)$$

$$BR = \frac{T_{60}(125Hz) + T_{60}(250Hz)}{2T_{med}} \quad (2.7)$$

di cui il primo è legato alla vivezza e alla pienezza dei suoni e il secondo al calore.

## 2.4 Correlazione tra intensità e chiarezza

Diversi studi sono stati compiuti per definire dei parametri che ben rappresentassero la sensazione di chiarezza del parlato e del discorso musicale. Ad esempio Thiele [9], basandosi sugli studi di Haas [10] e di altri ricercatori che avevano confermato che il suono che giunge con breve ritardo rispetto al suono diretto produce un apparente incremento dell'intensità percepita, propose di considerare il rapporto tra l'energia che perviene all'ascoltatore nei primi 50 ms della risposta all'impulso rispetto all'energia totale come *indice di definizione* (*Deutlichkeit*):

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}, \quad (2.8)$$

in cui  $t = 0$  è il momento in cui il suono diretto perviene all'ascoltatore e il 50 si riferisce all'intervallo di 50 ms; esso è sempre compreso tra 0 e 1. Questo parametro dunque deve essere maggiore possibile per il parlato, mentre per una sala da concerto un valore ottimale è 0,34. Esso è per lo più usato come parametro per la chiarezza del parlato, mentre per la chiarezza della musica viene usato l'*indice di chiarezza* introdotto dalla scuola di Dresda [11]:

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}, \quad (2.9)$$

espresso in dB e calcolabile anche dall'indice di definizione  $D_{80}$ , definito come nella formula 2.8 con 80 ms al posto di 50 ms, nel modo seguente:

$$C_{80} = -10 \log \frac{1 - D_{80}}{D_{80}}. \quad (2.10)$$

Il valore ottimale per  $C_{80}$  è intorno a 0 dB, ma resta comunque buono per valori tra -4 e +2 dB.

Una carenza di questi parametri è la loro sensibilità alla scelta del tempo di integrazione usato come riferimento: infatti la presenza di una riflessione importante a monte o a valle del limite di integrazione genera una forte dipendenza del parametro dal limite stesso. Uno dei parametri che elimina questo inconveniente pesando la risposta all'impulso nel tempo è il cosiddetto *Tempo Baricentrico Medio*  $t_s$ , definito dalla relazione:

$$t_s = \frac{\int_0^\infty tp^2(t)dt}{\int_0^\infty p^2(t)dt} \quad (2.11)$$

introdotto da Cremer e Kürer, e che risulta ben correlato all'intelligibilità del parlato come pure alla chiarezza della musica. Per la musica sinfonica un buon valore di  $t_s$  è inferiore ai 140 ms. Per finire elenchiamo due parametri che mettono in rapporto il suono diretto con la coda riverberante: il primo è l'ampiezza relativa della riflessione equivalente,  $A_{eq}$ , definito da Ando [12]:

$$A_{eq} = \sqrt{\frac{\int_\varepsilon^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\varepsilon p^2(t)dt}}, \quad (2.12)$$

ed espresso come rapporto di intensità del segnale, mentre il rapporto *Reverberant to Direct Ratio* ( $R/D$ ) usa lo stesso parametro ma espresso come livello in dB:

$$R/D = 10 \log \frac{\int_\varepsilon^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\varepsilon p^2(t)dt}. \quad (2.13)$$

## 2.5 Livello di intensità sonora e parametro G

Un altro parametro importante è il cosiddetto parametro di *Strength*, ovvero di potenza acustica: esso è legato alla sensazione di rinforzo sonoro che l'ambiente dà al segnale. Un ovvio rapporto di comparazione è quello usato nella norma ISO 3382, che raffronta il livello sonoro nella sala con quello che si avrebbe nello spazio aperto, in questo caso con il rilevatore ad una distanza convenzionale di 10 m (ricordiamo che nello spazio aperto il suono decade per divergenza sferica):

$$G = 10 \log \frac{\int_0^\infty p^2(t)dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t)dt}, \quad (2.14)$$

misurato in dB.

Se si considera la definizione di livello d'intensità sonora:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}, \quad (2.15)$$

dove  $p_0$  è la pressione sonora di riferimento, pari a  $20 \mu Pa$  e corrispondente alla soglia uditiva ad 1 KHz, e la definizione di livello di potenza sonora:

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}, \quad (2.16)$$

dove  $W_0$  è la potenza sonora di riferimento, pari ad 1 pW,  $G$  può essere calcolata come:

$$G = L_p - L_W + 31 \quad (2.17)$$

calcolato sempre in dB. Ovviamente dalla formula si deduce che se  $G > 0$  dB la sala introduce un'amplificazione del suono rispetto al livello ipotetico a 10 m in spazio aperto.

## 2.6 La sensazione di spazialità e i suoi caratteri descrittivi

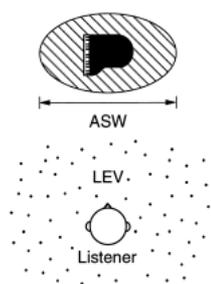


Figura 2.7: Concetti di ASW e LEV.

La spazialità è uno degli effetti soggettivi più importanti di una sala da concerto. Essa è ad esempio una delle caratteristiche che distinguono l'ascolto in sala dall'ascolto in spazio aperto, rendendo la prima un'esperienza molto più ricca e confortevole.

La sensazione di spazialità è un fenomeno molto complesso e dipende da svariati fattori (per una breve storia delle ricerche sulla sensazione spaziale si veda [13]), ma è stato dimostrato usando un'analisi multidimensionale [14] che essa dipende da almeno due componenti: una è l'*Apparent Source Width* (ASW), che corrisponde alla percezione di una sorgente sonora più ampia di quella che è in realtà, restando comunque alquanto direzionale; la seconda è la sensazione dell'ascoltatore di immersione nel campo sonoro, detta *Listener Envelopment* (LEV). Una rappresentazione

grafica dei due concetti è in Fig.2.7.

Diversi studi sono stati compiuti sull'argomento [3]. Si evince da essi che per la sensazione di spazialità sono fondamentali le riflessioni laterali e una bassa correlazione tra i suoni percepiti dalle due orecchie.

Tra i parametri descrittivi queste caratteristiche il primo fu il parametro di Efficienza Laterale (LE), proposto da Jordan (1981):

$$LE = \frac{\int_{25ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (2.18)$$

dove  $p_L(t)$  è il segnale registrato da un microfono con direzionalità a forma di otto il cui asse punti nella stessa direzione della congiungente i timpani dell'ascoltatore, mentre  $p(t)$  è il segnale registrato da un microfono omnidirezionale. Nella norma ISO 3382 è usato un parametro simile a quello di Jordan, definito come:

$$LF = \frac{\sum_{5ms}^{80ms} r_n \cos\theta}{\sum_0^{80ms} r_n} \simeq \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (2.19)$$

come proposto da Barron e Marshall (1981) dove viene escluso il suono diretto e si includono le prime riflessioni. Dalle formule si evince che  $LF > LE$  per la variazione al numeratore del tempo di integrazione. Per Barron e Marshall dei buoni valori di LF sono intorno a 0.25-0.3. Il termine centrale della formula si riferisce a pacchetti discreti di energia sonora in cui  $r_n$  è l'energia dell' $n$ -esima riflessione discreta e  $\theta$  l'angolo d'arrivo della riflessione rispetto all'asse passante per le orecchie dell'ascoltatore. Quest'ultimo è il parametro che vogliamo ottenere e di cui LF misurata con un microfono a forma di otto fornisce soltanto una stima in quanto, se ipotizziamo che la sensibilità direzionale del microfono segua la dipendenza angolare  $\cos\theta$ , le formule LF e LE peseranno i contributi direzionali come  $\cos^2\theta$ , con conseguente distorsione del valore voluto. Kleinter (1989) propone il parametro seguente per eliminare l'inconveniente:

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L(t)p(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}. \quad (2.20)$$

È stato studiato inoltre il legame tra sensazione di spazialità e mutua correlazione tra i segnali percepiti dalle due orecchie e si è visto come al crescere della seconda risulti accresciuta anche la prima. La funzione di mutua correlazione normalizzata dà una stima della somiglianza di due segnali distanziati di un intervallo di tempo  $\tau$ :

$$K(\tau) = \frac{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2t} \int_{-t}^t x(t)y(t+\tau)dt}{\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2t} \sqrt{\int_{-t}^t x^2(t)dt \int_{-t}^t y^2(t)dt}}; \quad (2.21)$$

nel nostro caso la mutua correlazione sarà tra le risposte all'impulso binaurali registrate (*Inter Aural Cross Function*):

$$IACF(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_s(t)p_d(t+\tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_s^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} p_d^2(t)dt}} \quad (2.22)$$

dove  $p_s$  e  $p_d$  sono le risposte all'impulso registrate rispettivamente all'orecchio sinistro e destro. Per come è definito, questo parametro richiede una registrazione binaurale con testa artificiale (cfr Par.4.3.2). Dall'IACF deriva l'indice IACC (*Inter Aural Cross Correlation*) definito da Ando [12] come:

$$IACC = \max_{-1ms < \tau < +1ms} |IACF(\tau)| \quad (2.23)$$

in cui l'intervallo di variazione di  $\tau$  dipende dal fatto che l'onda sonora impiega circa 1 ms per andare da un orecchio all'altro. Ovviamente la scelta dei tempi d'integrazione dell'IACF influenza anche i valori dell'IACC; in generale si considera lo  $IACC_\infty$  con  $t_1 = 0$  e  $t_2 = \infty$  oppure si divide l'intervallo di integrazione per determinare l' $IACC_E$  (*Early*) con  $t_1 = 0$  e  $t_2 = 80ms$  e l' $IACC_L$  (*Late*) con  $t_1 = 80ms$  e  $t_2 = \infty$ . Buoni valori per  $IACC_E$  per la valutazione dell'ASW sono compresi nell'intervallo 0.4-0.5, poiché valori superiori comporterebbero una sensazione di scarsa spazialità, valori inferiori invece un'eccessiva percezione della localizzazione della sorgente. Altri parametri proposti da Ando e intimamente legati alla IACC sono il  $\tau_{IACC}$  e il  $W_{IACC}$ . Il primo rappresenta la posizione del picco dello IACC, mentre il secondo ne rappresenta la larghezza all'interno della quale il picco resta entro il 10% del suo valore massimo (vedi Fig.2.8). Essi danno ulteriori informazioni sulla spazialità dell'ambiente.

Dei parametri elencati precedentemente, si ritiene [15] che i migliori stimatori della sensazione di ASW siano lo  $IACC_{E3}$  (in cui 3 sta per il valor medio del parametro calcolato sulle bande di ottava di 500Hz, 1 e 2KHz) e  $G_{low}$  (in cui *low* sta per basse frequenze, meno direzionali delle alte), mentre  $LF_E$  è un parametro leggermente più debole dei precedenti; secondo Beranek [5]  $IACC_{E3}$  è il parametro meglio correlato con la qualità della sala in generale.

Più difficile è invece la caratterizzazione del LEV. Secondo Bradley e Soulodre [16] livello, tempo di arrivo e direzione di arrivo delle tarde riflessioni laterali determinano il LEV percepito: esso è influenzato positivamente dal primo e dal secondo e tanto più rafforzato quanto più l'angolo di arrivo si avvicina

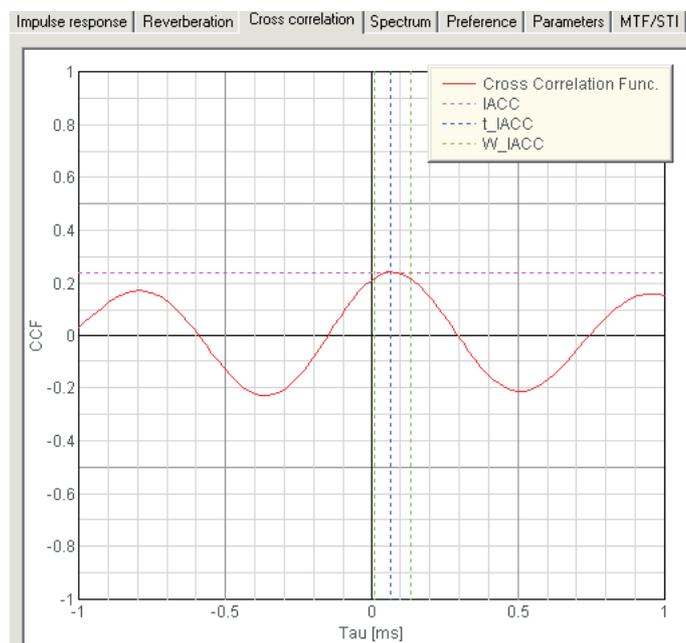


Figura 2.8: Visualizzazione grafica dei parametri di Ando.

ai  $90^\circ$ . Inoltre l'energia delle tarde riflessioni laterali nelle bande d'ottava tra i 125 e i 1000 Hz è risultata molto più importante per il senso del LEV, in quanto le riflessioni ad alta frequenza risultano più direzionali e danno la sensazione che il suono giunga da molteplici sorgenti discrete, non creando un senso di immersione sonora. Il parametro che sembra maggiormente correlato con la sensazione del LEV è il seguente:

$$LG_{80}^\infty = GLL = 10 \log \frac{\int_{80ms}^\infty p_L^2(t) dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t) dt} \quad (2.24)$$

in cui  $p_L$  è il segnale raccolto da un microfono direzionale a forma di otto (vedi Formula 2.18) e  $p_{10}$  è il segnale che perviene a un microfono omnidirezionale a 10 m in campo libero dalla sorgente (vedi Formula 2.14). Tuttavia queste considerazioni non sono univoche: è stato dimostrato [17] che il LEV, com'era intuibile, è influenzato anche dalle tarde riflessioni non laterali, benché queste restino sempre più importanti delle altre. In particolare anche le riflessioni da dietro la testa dello spettatore sembrano aumentare la sensazione di LEV, senza interferire con la sensazione di ASW [18]. Questa è un'ulteriore prova che le due sensazioni appartengono a due dimensioni diverse per il nostro udito.

## 2.7 Intelligibilità del segnale: indici STI e RASTI

L'intelligibilità della parola diventa un parametro importante sia quando una sala è usata anche per musica operistica, ma soprattutto quando essa è usata per spettacoli di prosa, in cui la comprensione delle parole diventa un'esigenza fondamentale. Il più importante fra i caratteri descrittivi della parola è il cosiddetto STI (*Speech Transmission Index*), introdotto da Houtgast e Steeneken [19, 20] sulla base dell'ipotesi fondamentale che la voce umana si basa su segnali modulati in intensità e che la comprensione sarà buona se non varia troppo l'entità della modulazione alle varie frequenze. Esso viene calcolato dalla cosiddetta funzione di trasferimento della modulazione (MTF) definita dal rapporto tra l'ampiezza di modulazione ricevuta e quella inviata nell'ambiente per bande d'ottava tra 125Hz e 8KHz:

$$m(F) = \frac{m_o}{m_i} \quad (2.25)$$

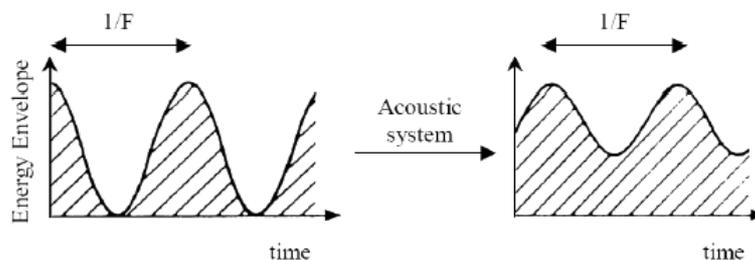


Figura 2.9: Funzione di trasferimento della modulazione MTF: a sinistra il segnale generato, a destra quello percepito.

Variando la modulante tra 0,63Hz e 12,5Hz si ottiene l'intera matrice MTF, composta da 7(bande di frequenza)\*14(frequenze modulanti)=98 valori. I 14 valori per ogni banda d'ottava vengono elaborati e trasformati in un rapporto segnale/rumore equivalente e graficati; infine essi possono essere pesati per ottenere un valore unico di STI. Il peso è ovviamente diverso per l'uomo e per la donna. Dato che lo STI è un parametro fin troppo ricco di informazioni, spesso è sufficiente calcolare il parametro RASTI (*RApid Speech Transmission Index*) tenendo in considerazione soltanto le bande d'ottava di 500Hz e 2KHz e modulandole rispettivamente con 4 e 5 frequenze. È stato dimostrato da Schroeder che questi parametri possono essere misurati direttamente dalla risposta all'impulso a patto che il sistema sia lineare,

passivo e tempo-invariante [21]: nel caso in questione questo corrisponde all'ipotesi di basso rumore di fondo, ipotesi certamente verificata nelle sale da concerto. Per calcolare ogni valore di  $m(F)$  dalla risposta all'impulso  $h(t)$ , viene applicato un filtro selettore come nella seguente formula:

$$m(F) = \frac{\int_0^\infty h_f^2(t) \exp(-i2\pi Ft) dt}{\int_0^\infty h_f^2(t) dt}. \quad (2.26)$$

## 2.8 Rapporto tra valutazioni soggettive e parametri oggettivi

La correlazione tra le valutazioni soggettive e i parametri misurabili in una sala da concerto è di certo un dei caratteri salienti dell'acustica architettonica ed è la base per ogni intervento su teatri esistenti e per la progettazione di nuovi [12]. Il metodo di correlazione consiste nel sottoporre a degli esperti (musicisti, critici musicali, audiofili, etc..) un questionario con una serie di coppie di giudizi soggettivi legati alla qualità del suono da essi percepito in una sala da concerto (ad es.: secco-riverberante, morbido-duro etc..) e con una scala di valutazione (ad esempio in [22], da 1 a 5), allo scopo di correlare il meglio possibile le sensazioni soggettive ai parametri oggettivi con una retta:

$$Y_{Sogg} = A * X_{Ogg} + B. \quad (2.27)$$

Il concetto è lo stesso presentato per primo da Beranek (cfr. Par.2.3). Il *fit* viene calcolato con il metodo statistico dei minimi quadrati: si calcoleranno in questo modo A, B, deviazione standard e covarianza che caratterizzano la popolazione analizzata; si calcolerà quindi il coefficiente di regressione lineare  $r$ , definito come:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_x \sigma_y}} = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.28)$$

con  $\sigma_x, \sigma_y$  e  $\sigma_{xy}$  a rappresentare rispettivamente deviazione standard in  $x$  e  $y$  e covarianza della distribuzione.

Come da definizione, il coefficiente di regressione lineare  $r$  quantifica la bontà del *fit* lineare ai campioni in esame: esso è sempre compreso tra -1 e 1, dove 1 rappresenta la perfetta correlazione lineare dei dati, -1 la perfetta anticorrelazione e 0 indica la necessità di gradi superiori al primo per l'approssimazione della relazione tra i dati. Il parametro oggettivo può essere considerato buon

descrittore della coppia di parametri soggettivi se il coefficiente  $r$  ha modulo  $|r| > 0.3$ .

Ad esempio in [22] sono state messe in relazione 14 coppie di giudizi con 12 parametri; da esso risulta che i parametri acustici in maggior correlazione con le coppie di giudizi soggettivi sono:

- EDT con
  1. diffuso/concentrato,  $r=-0.36$ ,
  2. secco/riverberante,  $r=0.36$ ;
- $T_{30}$  con
  1. diffuso/concentrato,  $r=-0.30$ ,
  2. secco/riverberante,  $r=0.35$ ;
- ITDG con morbido/duro:  $r=0.35$ ;
- $C_{80}$  con piacevole/spiacevole:  $r=0.34$ ;
- G con
  1. piacevole/spiacevole,  $r=-0.41$ ,
  2. morbido/duro,  $r=-0.35$ ,
  3. diffuso/concentrato,  $r=-0.40$ ,
  4. debole/forte,  $r=0.34$ ,
  5. sommesso/sonoro,  $r=0.34$ ;
- $A_{eq}$  con
  1. piacevole-spiacevole,  $r=-0.37$ ,
  2. morbido-duro,  $r=-0.40$ ,
  3. rotondo-spigoloso,  $r=-0.35$ ,
  4. diffuso-concentrato,  $r=-0.38$
- R/D con
  1. piacevole-spiacevole,  $r=-0.35$ ,
  2. morbido-duro,  $r=-0.4$ ,
  3. rotondo-spigoloso,  $r=-0.35$ ,
  4. diffuso-concentrato,  $r=-0.38$ .

È evidente come i valori del coefficiente siano abbastanza bassi (considerato anche che la matrice era 12x14 e che sono stati riportati soltanto i valori di  $|r| \geq 0.34$ ); tuttavia ciò è dovuto anche al grande rumore statistico del caso in esame e usando risposte soggettive in condizioni più controllate possono essere ottenuti risultati migliori [23].

Ando [12] inoltre considera che a tipologie di spettacolo diverse corrisponderanno diverse caratteristiche ottimali della sala. A questo scopo egli ha sviluppato una teoria in cui viene calcolato un indice di preferenza  $S_i$  relativo ad un certo tipo di musica con un insieme di fattori che pesano quattro parametri acustici:

$$S_i = -w_i |x_i|^{\frac{3}{2}} \quad (2.29)$$

dove le  $x_i$  sono i seguenti parametri normalizzati rispetto a un valore preferito, ricavato da indagini psicoacustiche [3]:

- $x_1 \approx G$
- $x_2 \approx ITDG$
- $x_3 \approx T_r$
- $x_4 \approx IACC$

I pesi invece sono i seguenti:

- $w_1 =$ 
  1. 0.07 per  $x_1 > 0$
  2. 0.04 per  $x_1 < 0$
- $w_2 =$ 
  1. 1.41 per  $x_2 > 0$
  2. 1.11 per  $x_2 < 0$
- $w_3 =$ 
  1.  $0.45 + 0.74 * A_{eq}$  per  $x_3 > 0.4$
  2.  $2.36 - 0.42 * A_{eq}$  per  $x_3 < 0$
- $w_4 = 1.45$  sempre.

I valori preferiti dipendono come detto dal brano musicale, e in particolare dal tempo di autocorrelazione: esso è in relazione con la “velocità” del pezzo musicale ed è definito come il tempo nel quale l’involuppo della funzione di autocorrelazione normalizzata (cfr. Form 2.21 in cui  $x(t)$  e  $y(t)$  sono lo stesso segnale) si riduce di un fattore 10. L’indice di preferenza di Ando si assesta per le sale esistenti su un valore di circa -2, con qualche punta di -1. È da notare che esso è in relazione con un valore ideale di tutti i parametri, in corrispondenza dei quali assumerà il valore 0.

# Capitolo 3

## Auditorium Parco della Musica

Questo breve capitolo contiene una descrizione del complesso “Parco della Musica” in Roma allo scopo di illustrarne le caratteristiche architettoniche, in particolare legate al problema dell’acustica.

### 3.1 Caratteristiche del complesso

L’Auditorium Parco della Musica, progettato dall’Architetto Renzo Piano, nasce dall’esigenza per la città di Roma di uno spazio culturale polifunzionale in grado di fungere da polo d’attrazione musicale in Italia e in Europa, una vera e propria “città della musica”. Il complesso sorge nel quartiere Flaminio, ed è composto da:

- tre sale da concerto disposte a raggiera, così intitolate:
  1. la più grande, che può ospitare circa 2800 posti a sedere, all’Accademia Nazionale di Santa Cecilia;
  2. quella di grandezza intermedia, da circa 1200 posti, al maestro Giuseppe Sinopoli;
  3. infine la più piccola, da circa 700 posti, al maestro Goffredo Petrassi;
- una cavea, intitolata al maestro Luciano Berio, e intesa come *focus* del complesso, può ospitare circa 3000 posti ed è un vero e proprio anfiteatro all’aperto;
- un grande foyer che unisce le entrate di tutte e tre le sale e ospita anche il Museo Archeologico dell’Auditorium;

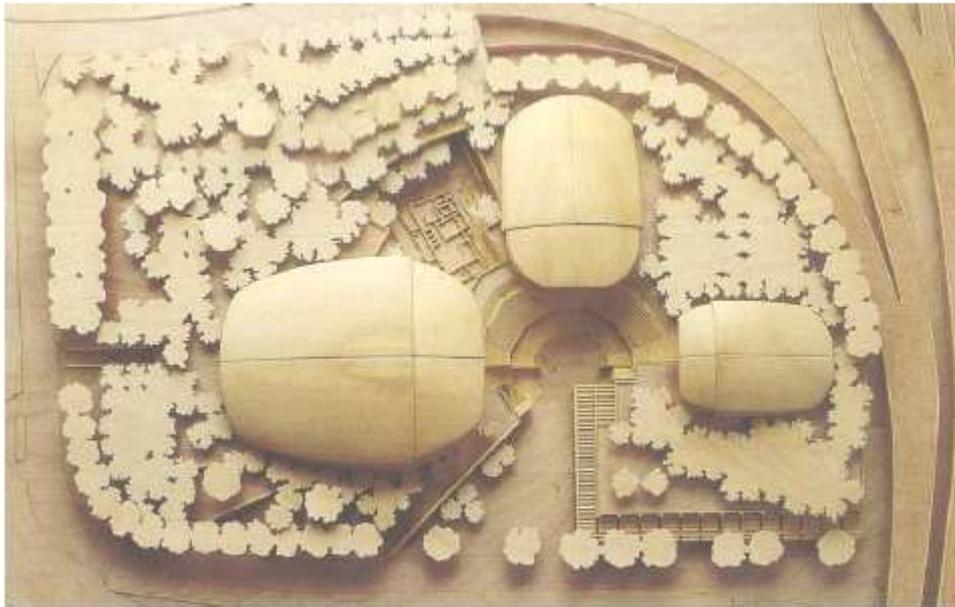


Figura 3.1: Modello dell’Auditorium Parco della Musica.

- un parco pensile da circa  $38000\text{ m}^2$  che si sviluppa sulla copertura del complesso;
- una serie di servizi come libreria, bar, aree per l’amministrazione etc..

## 3.2 La sala Santa Cecilia

La sala S. Cecilia, come detto, è la più grande delle tre e, contrariamente alle altre, che hanno forma parallelepipedica (*shoe-box*), è di forma detta “geometrica” dagli acustici, intesa nel senso che non può essere classificata tra le forme classiche delle sale da concerto, come la già citata forma parallelepipedica, la forma a ferro di cavallo (tipica di molti teatri lirici italiani, come il San Carlo di Napoli e la Scala di Milano) e *fan-shaped* (con le pareti laterali divergenti). La scelta di una forma particolare della sala è una sfida e una sperimentazione, dato che la forma parallelepipedica risulta acusticamente molto valida (a patto che le sue pareti abbiano una buona capacità diffusiva [24]), come dimostrano diversi studi [5],[25].

L’elemento caratteristico della sala è sicuramente il legno. Infatti nell’intenzione di Piano c’è stato sicuramente il bisogno di porre la musica al centro del suo “discorso architettonico”, e la scelta del legno, come anche la forma

della sala, evocano sicuramente la cassa acustica di risonanza degli strumenti, quasi a volerne rappresentare il prolungamento all'esterno degli strumenti stessi; l'Architetto si è avvalso infatti del parere di molti musicisti come il già citato Luciano Berio.

Caratteristici della sala sono i 26 grandi cassettoni diffondenti che formano il controsoffitto, costruiti in legno di ciliegio americano e aventi un'ampia superficie. In tutto la sala comprende una superficie di  $3400 m^2$  e occupa un volume di circa  $30000 m^3$ , ciò che la rende una delle più grandi del mondo [5]. I posti a sedere sono divisi tra una grande platea, che ne comprende circa un migliaio, e diverse tribune con terrazze disposte a vigneto.

La diffusione del suono è garantita da molteplici elementi: oltre ai già citati pannelli del controsoffitto, sono presenti pannelli diffusori intorno al palcoscenico, disposto su una superficie di  $336 m^2$ , sopra al palcoscenico, per permettere ai musicisti di sentirsi vicendevolmente, e intorno a tutta la platea: se immaginiamo di utilizzare un sistema di riferimento ortonormale in cui l'asse  $x$  coincida con l'asse di simmetria della sala, l'asse  $z$  sia disposto dal basso verso l'alto e l'asse  $y$  sia normale agli altri due, i pannelli attorno alla platea risultano inclinati sia rispetto all'asse  $x$  sia rispetto all'asse  $z$ , allo scopo di impedire la formazione di dannosi modi propri. L'isolamento acustico è assicurato dalla struttura della copertura, composta da travi in legno lamellare con elementi in acciaio e strati di cemento armato, più un involucro esterno fatto in piombo. Ciò permette un isolamento esterno di coefficiente  $R = 70$  dB e un rumore interno di soli 25 dB circa. Inoltre la presenza di filtri acustici tra le porte e i corridoi interni della struttura contribuiscono a mantenere basso il livello di rumore proveniente dai macchinari di aerazione della sala, le cui bocche sono poste sotto i sedili (cfr. fig. 3.5).

I posti a sedere sono inoltre costruiti con un materiale assorbente che rende la risposta della sala vuota non troppo dissimile a quella della sala piena, in modo da non avere forti discrepanze tra le due situazioni.

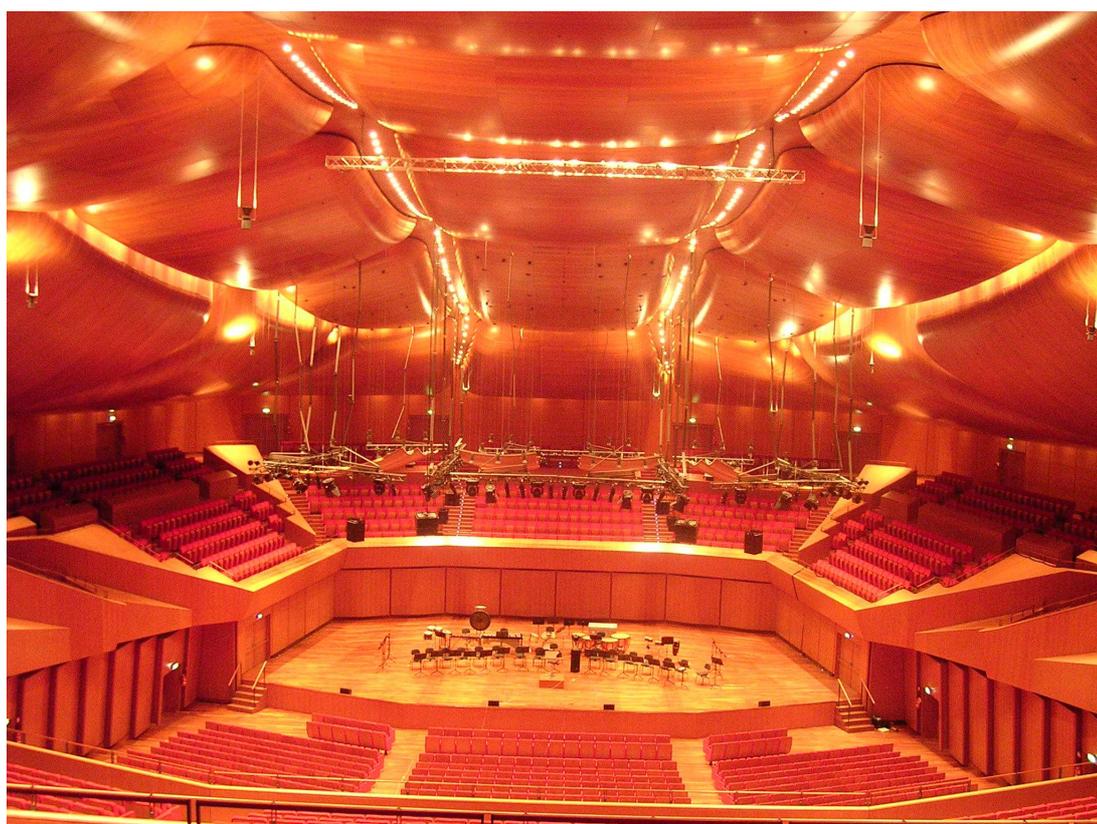


Figura 3.2: Vista dell'interno della sala S. Cecilia: si notino i pannelli del controsoffitto, quelli sovrastanti il palcoscenico e quelli di contorno al palcoscenico e alla platea.



Figura 3.3: Vista dell'esterno del complesso, con in evidenza la copertura in piombo della sala.

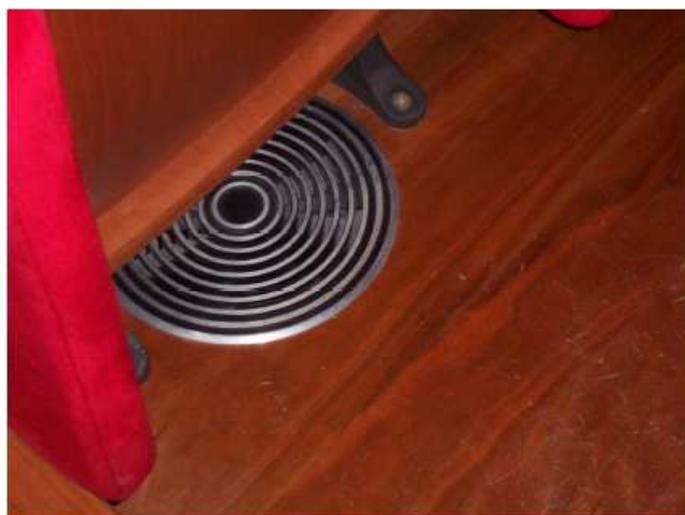


Figura 3.4: Le bocche d'aerazione della sala, poste sotto i sedili.

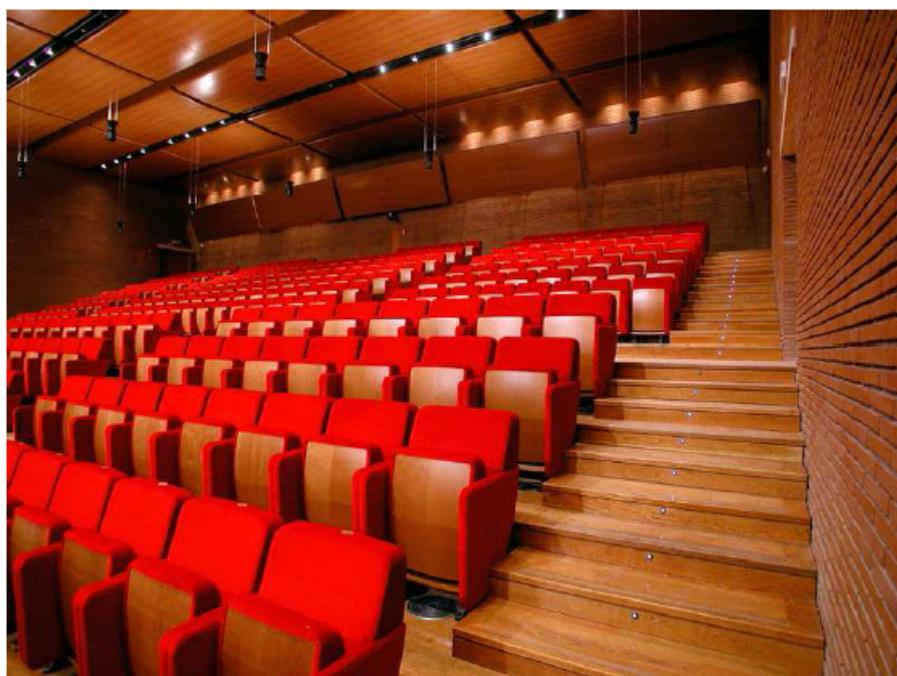


Figura 3.5: Vista interna della Sala Sinopoli, con le poltrone fonoassorbenti in evidenza.

# Capitolo 4

## Tecniche di misurazione e simulazione al calcolatore

### 4.1 Cenni di teoria dei segnali

Dal punto di vista della teoria dei segnali un sistema fisico può essere schematizzato come una *black box* al cui ingresso si presenti un segnale di prova, al quale il sistema stesso risponda in modo che all'uscita abbia un segnale diverso, "trasformato" dal sistema stesso.

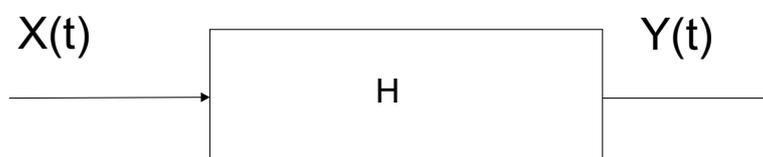


Figura 4.1: Risposta di un sistema ad una sollecitazione.

Se si suppone che il sistema in esame sia stabile, lineare e tempo-invariante, allora l'informazione completa del modo in cui il sistema risponde ad una sollecitazione è contenuta nella sua risposta all'impulso,  $h(t)$ . La linearità presunta del sistema, infatti, obbedisce al principio di sovrapposizione degli effetti, e quindi tutto ciò che fa il sistema è ridistribuire gli impulsi che ha ricevuto nel tempo. La formulazione matematica di questo procedimento è l'operazione di convoluzione:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (4.1)$$

in cui il terzo membro dell'equazione esprime la proprietà commutativa della convoluzione. Dunque se si immette nel sistema una  $\delta$  di Dirac, all'uscita del sistema si otterrà proprio la risposta all'impulso:

$$y(t) = \delta \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau)h(\tau)d\tau = h(t). \quad (4.2)$$

Il problema è che nelle misure reali non è possibile immettere nel sistema energia praticamente infinita in un brevissimo tempo come richiederebbero le proprietà della  $\delta$  di Dirac (cfr. Par.4.2.1).

Passando nel dominio delle frequenze tramite trasformata di Fourier, la convoluzione diventa una semplice moltiplicazione tra gli spettri:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) \rightarrow Y(\omega) = X(\omega) * H(\omega) \quad (4.3)$$

la funzione  $H(\omega)$  è detta funzione di trasferimento del sistema (FDT). Questa definizione consente di ricavare la FDT di un sistema ideale; tuttavia, per ottenere una migliore stima della FDT reale di un sistema (per esempio andando a ridurre gli effetti del rumore di fondo), si utilizzando altre tecniche. Ad esempio,  $X(\omega)$  e  $Y(\omega)$ , così come  $H(\omega)$ , sono funzioni complesse che possono essere rappresentate come composte da parte complessa e parte immaginaria, ma anche da ampiezza e fase. Moltiplicando entrambi i lati della formula 4.3 per  $X(\omega)^*$ , si ottiene:

$$X(\omega)^*Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)X(\omega)^* \quad (4.4)$$

da cui:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)^*Y(\omega)}{|X(\omega)|^2}. \quad (4.5)$$

in cui il numeratore è detto *Spettro Incrociato* tra i segnali  $X(\omega)$  e  $Y(\omega)$ , mentre il denominatore è detto *Autospettro* (o *Spettro di potenza*) del segnale  $X(\omega)$ . Ovviamente la risposta all'impulso si ottiene antitrasformando la funzione  $H(\omega)$  secondo Fourier. Dalla formula 4.5 si vede però che il segnale  $X(\omega)$  non deve avere zeri nel suo spettro, ovvero deve avere contributi a tutte le frequenze in esame, per evitare che la risposta all'impulso calcolata renda il sistema instabile.

Al calcolatore tutte queste quantità risultano poi quantizzate; si utilizzano quindi degli algoritmi che elaborino i valori puntuali delle funzioni campionate. Il corrispettivo numerico della trasformata di Fourier sarà la *Fast Fourier Transform* (FFT), che viene calcolata ovviamente non su una scala del tempo continua ma su finestre campione.

Un altro modo per ottenere la risposta all'impulso di un sistema è la cosiddetta *Time Reversal Mirror*, consistente nel capovolgere la funzione di partenza sull'asse dei tempi. Il problema di questa tecnica è che se il segnale non è a spettro piatto, in uscita la sua "colorazione" (ovvero il suo spettro in frequenza non piatto) sarà ulteriormente rafforzata, distorcendo quella della risposta all'impulso. È per questo che si tende ad eccitare il sistema con segnali a spettro piatto. Le tecniche MLS e di *sine sweep* descritte in seguito si basano proprio sul *Time Reversal Mirror*, in quanto sono a spettro piatto (la prima) o di facile bilanciamento spettrale (la seconda). Infatti in questo modo si ottiene il cosiddetto *filtro inverso*, ovvero la funzione che, convoluta col segnale di partenza, rende una  $\delta$  di Dirac:

$$x^{-1} \otimes x = \delta \quad (4.6)$$

e dunque:

$$y \otimes x^{-1} = x \otimes h \otimes x^{-1} = h \otimes x \otimes x^{-1} = h \otimes \delta = h. \quad (4.7)$$

## 4.2 Tecniche di misura

### 4.2.1 Segnale impulsivo

Un metodo di misura della risposta all'impulso di un sistema acustico è quella di fornire mediante un impianto mecano-acustico o elettro-acustico una perfetta  $\delta$  di Dirac al sistema. Questo metodo, seppure semplicissimo concettualmente, è di difficile attuazione pratica: infatti l'impulso dovrà superare di alcune decine di dB il rumore di fondo della sala e avere la durata di pochissimi intervalli di campionamento (che sarà, a seconda dei casi, di 44.1, 48 o 96 KHz, a seconda della scheda di campionamento). I modi per ottenere una risposta all'impulso con metodo impulsivo saranno dunque l'applicazione di una  $\delta$  di Dirac a un sistema amplificatore-diffusore, che soffre dello svantaggio di non consentire un buon livello sonoro e di introdurre una distorsione del segnale causata dal diffusore, oppure l'utilizzo del forte rumore causato da un'esplosione: nella fattispecie si usa lo scoppio di un palloncino, una scintilla elettrica, oppure lo sparo di una pistola caricata a salve, con uno spettro possibilmente piatto, cosa che non sempre è possibile e controllabile. Inoltre questa tecnica soffre del problema che il suono diretto non è una vera  $\delta$  di Dirac ma si protrae nel tempo a diverse decine di tempi di campionamento. Per tutte queste ragioni le tecniche di misura con segnale impulsivo sono oggi usate raramente.

### 4.2.2 Segnale MLS

Abbiamo visto come, tramite la convoluzione, sia possibile ottenere la risposta all'impulso da qualsiasi sorgente sonora, a patto che se ne conosca l'andamento in funzione del tempo. La convoluzione però sarà molto semplice e veloce col metodo seguente.

Il segnale MLS (*Maximum Length Sequence*) è una sequenza pseudo-casuale di valori binari. Essa è ottenuta da un registro a scorrimento in cui due cifre del registro stesso vengono combinate tra loro mediante una operazione di XOR e il cui risultato viene inviato nell'ultima casella dello shift-register, facendo scorrere le altre cifre; quella che era in testa allo shift-register viene inviata come output (cfr. Fig. 4.2.2).

Il segnale MLS ha delle caratteristiche peculiari: per quanto deterministico, esso ha spettro praticamente piatto (per questo è detto pseudo-casuale); inoltre il suo periodo dipende soltanto dalla lunghezza dello shift-register, in quanto il valore iniziale dello shift-register si ripresenterà soltanto dopo  $2^n - 1$  valori (in acustica si utilizzano spesso i 16 bit, corrispondenti a 65535 campioni). Un ulteriore vantaggio del segnale MLS consiste nella sempli-

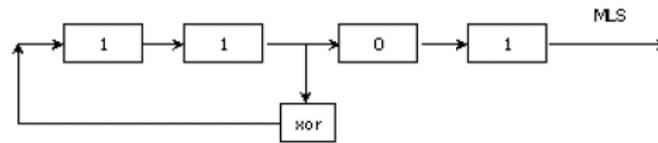


Figura 4.2: Esempio di shift-register a 4 bit per la generazione di un segnale MLS.

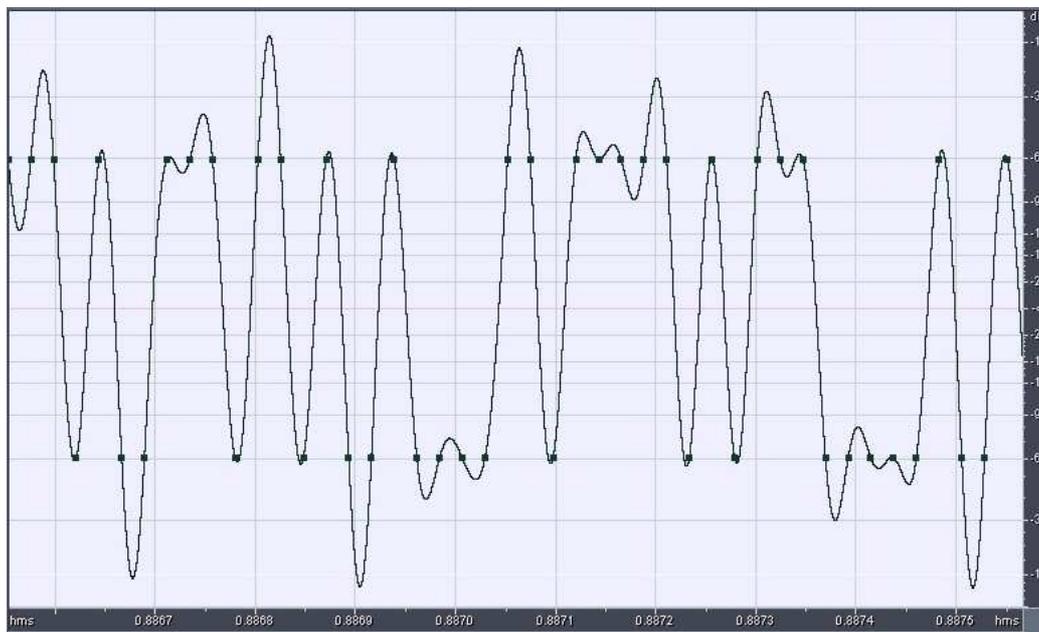


Figura 4.3: Segnale MLS; i valori veri del segnale sono quelli segnalati dai punti.

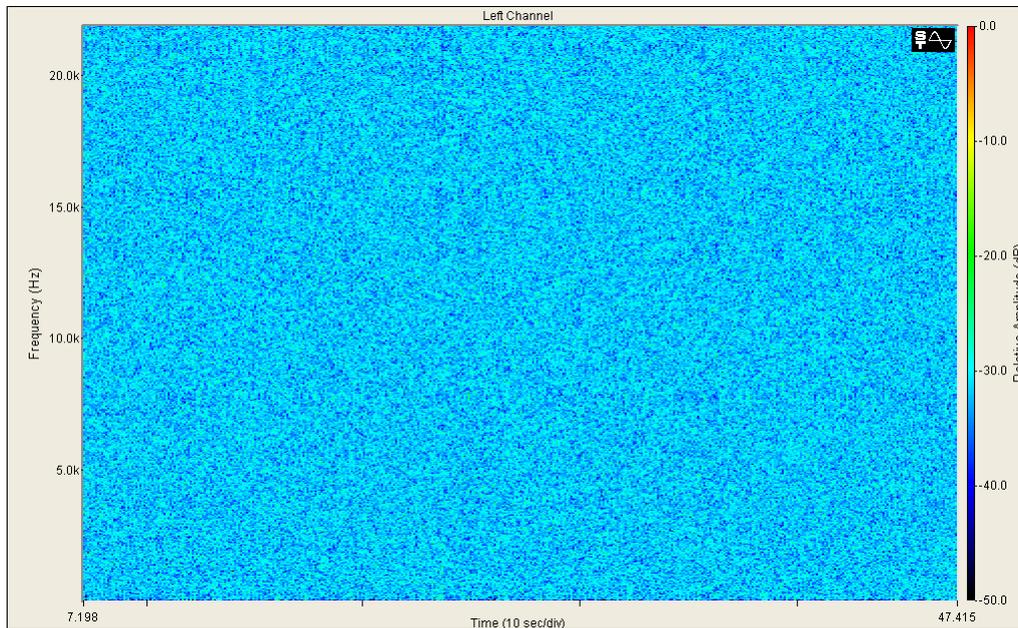


Figura 4.4: Spettrogramma di un segnale MLS: lo spettro è piatto a tutte le frequenze per tutta la lunghezza del segnale.

ce determinazione dell'inversa  $MLS^{-1}$ , ottenibile semplicemente usando lo stesso segnale ribaltato sull'asse dei tempi, e, come detto, composto soltanto da 0 e 1: ciò rende la deconvoluzione del segnale immediata, in quanto si riduce a delle semplici somme (algoritmo della *Hadamard transform*). Quest'ultimo vantaggio è stato ritenuto di non poco conto fino a qualche anno fa, quando la potenza dei calcolatori in commercio era molto inferiore rispetto a quella attuale; infatti sono state messe in commercio apparecchiature che implementavano lo shift-register via hardware e corredate di un software particolarmente efficace chiamato MLSSA. Il difetto di questo sistema è l'estrema sensibilità a fenomeni di distorsione non lineare presenti nei trasduttori, che comportano a volte la creazione di picchi spuri che appaiono come echi in realtà inesistenti (Fig.4.2.2). Ciò rende la tecnica MLS soggetta a distorsioni nella valutazione dei parametri acustici e nella auralizzazione di segnali (vedi par. 4.5).

### 4.2.3 Segnale di *swept sine*

Un ulteriore metodo per la stima della risposta all'impulso di un sistema lineare tempo-invariante è quello di sottoporlo a un segnale sinusoidale, la cui frequenza vari nel tempo, del tipo  $x(t) = A \sin(\omega t)$ , con  $\omega = \omega(t)$ ; lo scopo

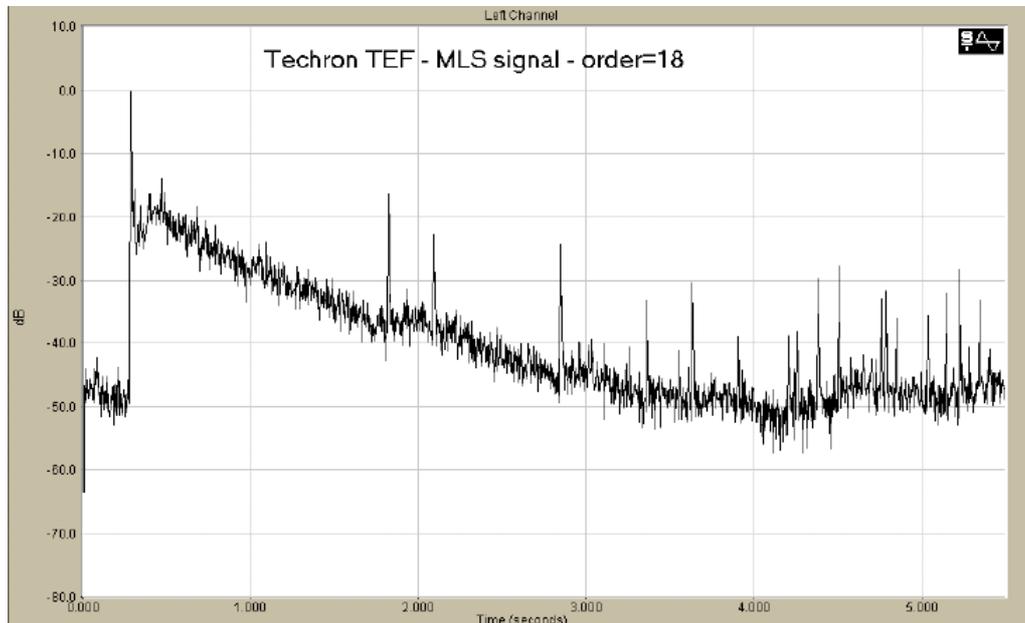


Figura 4.5: Risposta all'impulso sperimentale ottenuta con tecnica MLS con la comparsa di echi fittizi dovuti alle non linearità.

principale dell'introduzione del nuovo sistema di misura è la sua capacità di dividere la componente lineare da quelle di distorsione armonica, in quanto se il sistema sottoposto ad analisi a una data frequenza risponderà con la presenza di armoniche superiori, sarà evidente che esse provengono appunto da fenomeni non-lineari. In genere l'utilizzo del segnale di *swept sine* viene utilizzato con  $\omega(t)$  che varia con legge lineare o esponenziale nello spettro dell'udibile umano: tra le due soluzioni la preferita è senza dubbio la seconda, in quanto si sofferma molto sulle basse e medie frequenze, "spazzando" velocemente quelle alte. Le funzioni inverse  $x^{-1}(t)$  dei segnali di *swept sine* saranno:

- nel caso lineare, esattamente la stessa funzione con l'asse dei tempi invertito;
- nel caso esponenziale, oltre all'inversione dell'asse dei tempi occorrerà un adeguamento per quel che riguarda l'ampiezza, in quanto nel segnale diretto essa si riduce di 3 dB/ottava; dunque il segnale inverso verrà amplificato con un filtro che guadagni 6 db/ottava (Fig. 4.2.3,4.9)

In questo lavoro di tesi è stato usato il suddetto segnale di *sine sweep* esponenziale. La sua formula analitica, la cui derivazione peraltro è semplicissima [26], è la seguente:

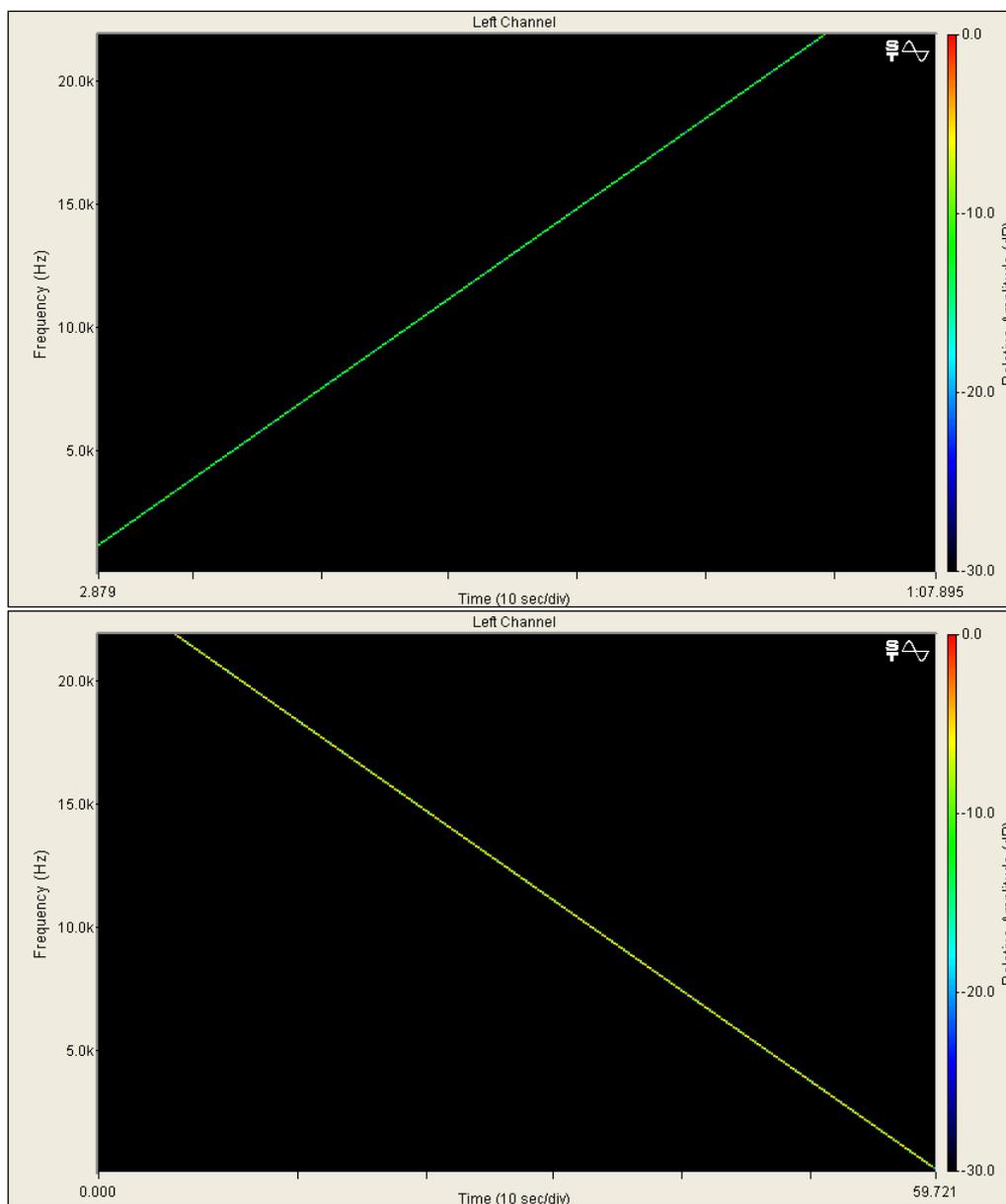


Figura 4.6: Spettrogramma di un *sine sweep* lineare e sua funzione inversa (scala di frequenze lineare).

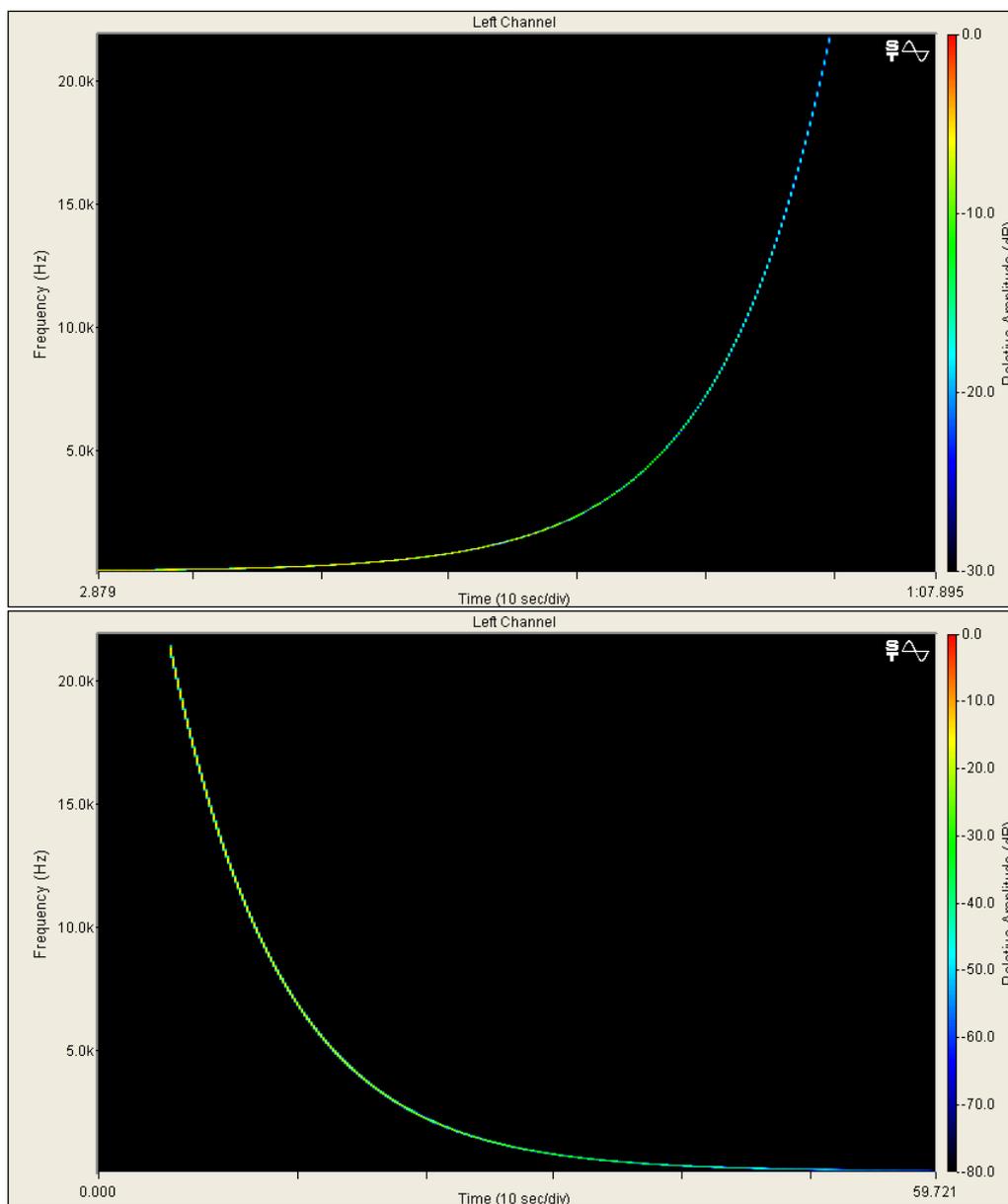


Figura 4.7: Spettrogramma di un *sine sweep* esponenziale e sua funzione inversa (scala di frequenze lineare).

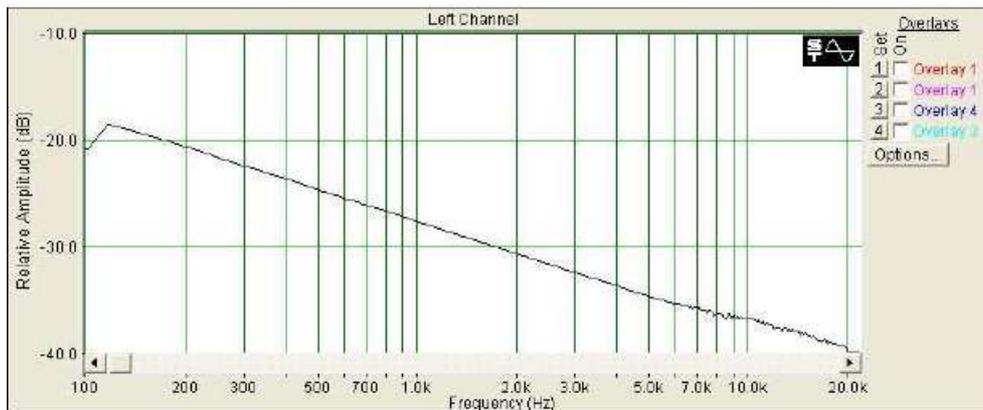


Figura 4.8: Spettro di un segnale di *sine sweep* esponenziale.

$$x(t) = \text{sen}\left[\frac{\omega_1 T}{\ln(\frac{\omega_1}{\omega_2})} \exp\left(\frac{t}{T} \ln\left(\frac{\omega_1}{\omega_2} - 1\right)\right)\right] \quad (4.8)$$

dove  $T$  è la durata dello *sweep*, mentre  $\omega_1$  e  $\omega_2$  sono rispettivamente la frequenza di partenza e quella di arrivo dello *sweep*.

Una considerazione sulle caratteristiche dell'ambiente architettonico dal punto di vista della trasmissione del segnale è ora d'obbligo; il sistema "sala d'ascolto" infatti non è assolutamente lineare e tempo-invariante come lo vorremmo, e per diversi motivi:

- **non è lineare**, in quanto in esso è sempre presente un rumore di fondo; inoltre le pareti possono rispondere alle stimolazioni acustiche con meccanismi non lineari (che però sono trascurabili alle potenze sonore usate);
- **non è tempo-invariante**, in quanto, oltre a dipendere dalla presenza o meno di pubblico e di esecutori (ed ovviamente dal tipo di pubblico e esecutori: basti solo pensare che ad esempio d'inverno il pubblico sarà presente nella sala con abiti più pesanti e quindi più fonoassorbenti), ma anche dalle condizioni di temperatura e di umidità, che andranno a far variare la velocità del suono e l'assorbimento, soprattutto alle alte frequenze.

Inoltre bisogna considerare che le perdite di energia dell'ambiente lo rendono **non isolato dall'esterno** (in un senso e nell'altro, ovvero con perdita di energia sonora dall'interno verso l'esterno e con introduzione di rumore

esterno verso l'interno della sala). Pur tuttavia possiamo rimediare a queste problematiche considerando che:

- il rumore presente nella sala da concerto è di poche decine di dB (in genere al di sotto di 25 dB), tale da influire poco sulle misurazioni a patto che esse vengano fatte con un livello di intensità molto alto rispetto ad esso;
- le misurazioni possono essere eseguite a sala vuota e a sala piena, come se fossero due sale differenti). Naturalmente si opera in modo da garantire alla sala sempre le stesse condizioni termiche e igrometriche.

Dunque se vengono tenute in conto queste ultime considerazioni, la sala può essere ritenuta un sistema lineare e tempo-invariante. I problemi di non-linearità potranno quindi essere attribuiti al sistema elettro-acustico. Consideriamo un sistema schematizzato a “black box” come in figura 4.9:

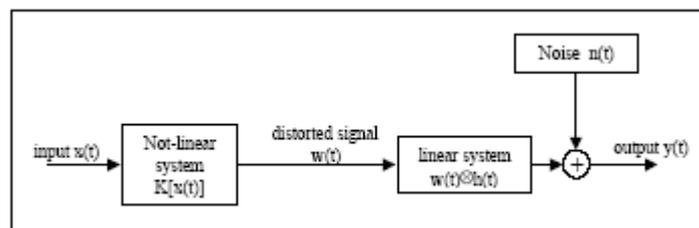


Figura 4.9: *Flow chart* di un segnale immesso in una sala.

nella *flow chart* si vede come il segnale passi attraverso un sistema non-lineare e tempo invariante (che nel nostro caso sarà il sistema elettro-acustico) e quindi, distorto, venga immesso nel sistema lineare e tempo-invariante (la sala); ad esso viene aggiunto del rumore e quindi viene presentato come uscita (si noti che la distorsione non-lineare del microfono è compresa nella parte di distorsione non-lineare iniziale). Trascurando il rumore è possibile sviluppare la risposta di un sistema non lineare secondo la serie detta di Volterra [27]; la sua rappresentazione è la seguente:

$$y(n) = \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} h_1(m_1)x(n-m_1) + \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{m_2=-\infty}^{+\infty} h_2(m_1, m_2)x(n-m_2)x(n-m_1) + \dots \quad (4.9)$$

Questa forma generale si riferisce a sistemi non-lineari con memoria in ogni grado di non-linearità (isteresi magnetica). In questo caso però si considererà il termine lineare come l'unico stadio con memoria. Ciò comporta che

le risposte non-lineari  $h_2, h_3$  etc.. si ridurranno da matrice multi-dimensionale ai soli termini sulla diagonale. A seguito di queste considerazioni la formula 4.9 si riduce a:

$$y(n) = \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} h_1(m_1)x(n - m_1) + \sum_{m_1=-\infty}^{+\infty} h_2(m_1)x^2(n - m_1) + \dots \quad (4.10)$$

Dunque immettendo il segnale nel sistema e registrando l'uscita  $y(t)$ , quest'ultima conterrà il segnale di *sine sweep* trasformato, con la distorsione armonica ben evidente nello spettrogramma. Ad esempio in fig. 4.11 è rappresentato lo spettrogramma del segnale registrato con un semplice corto ingresso-uscita di un computer portatile, in cui l'ingresso è rappresentato dal segnale di *sine sweep* e la distorsione in uscita è causata dalla sola elettronica del sistema.

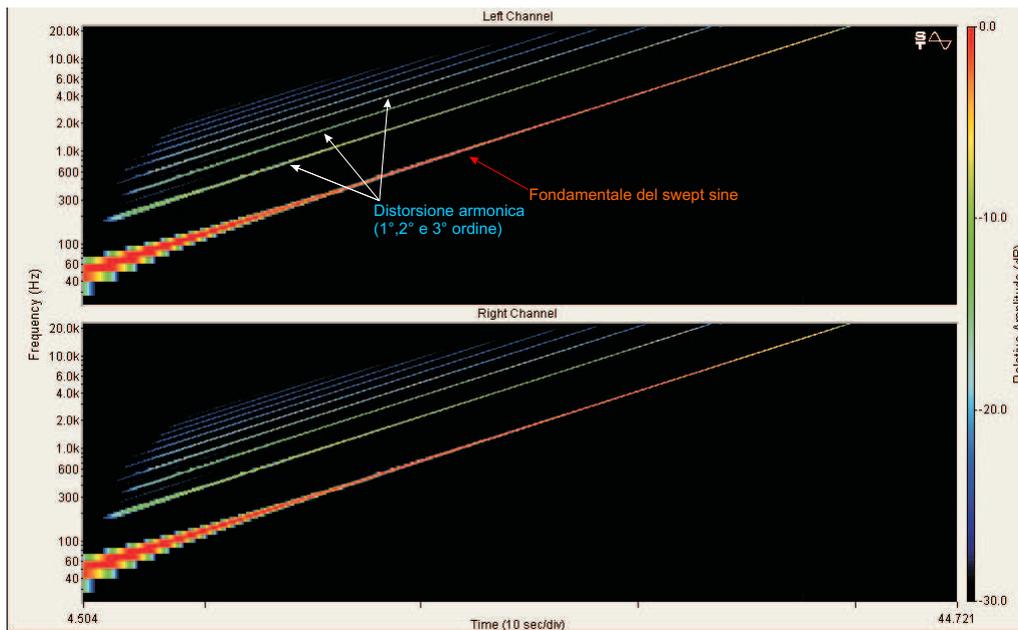


Figura 4.10: Spettrogramma della distorsione di un sistema; la distorsione armonica è indicata dalle frecce blu.

La deconvoluzione dell'uscita  $y(t)$  con il segnale inverso  $x^{-1}(t)$  darà come risultato una serie di risposte all'impulso distanziate nel tempo; esse non saranno direttamente le risposte impulsive non-lineari  $h_n$  della Formula 4.10 (detti *kernels* di Volterra), ottenibili però tramite la soluzione di un sistema di equazioni lineari [27]. Per la precisione le risposte all'impulso saranno distanziate nel tempo di un intervallo di tempo sempre uguale per ogni ordine

di distorsione; infatti se si indica con  $\Delta t$  il suddetto intervallo e con N l'ordine di non-linearità, e ricordando che la derivata temporale della funzione all'interno dell'argomento del seno dell'equazione 4.8 dà come risultato la frequenza angolare nel tempo, otteniamo [26]:

$$N \frac{d}{dt} \left[ \frac{\omega_1 T}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} (e^{\frac{t}{T} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} - 1) \right] = \frac{d}{dt} \left[ \frac{\omega_1 T}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} (e^{\frac{t+\Delta t}{T} \ln \frac{\omega_2}{\omega_1}} - 1) \right] \quad (4.11)$$

(il significato degli altri termini dell'equazione è lo stesso che in formula 4.8), da cui si trae:

$$\Delta t = T \frac{\ln(N)}{\ln \frac{\omega_2}{\omega_1}}. \quad (4.12)$$

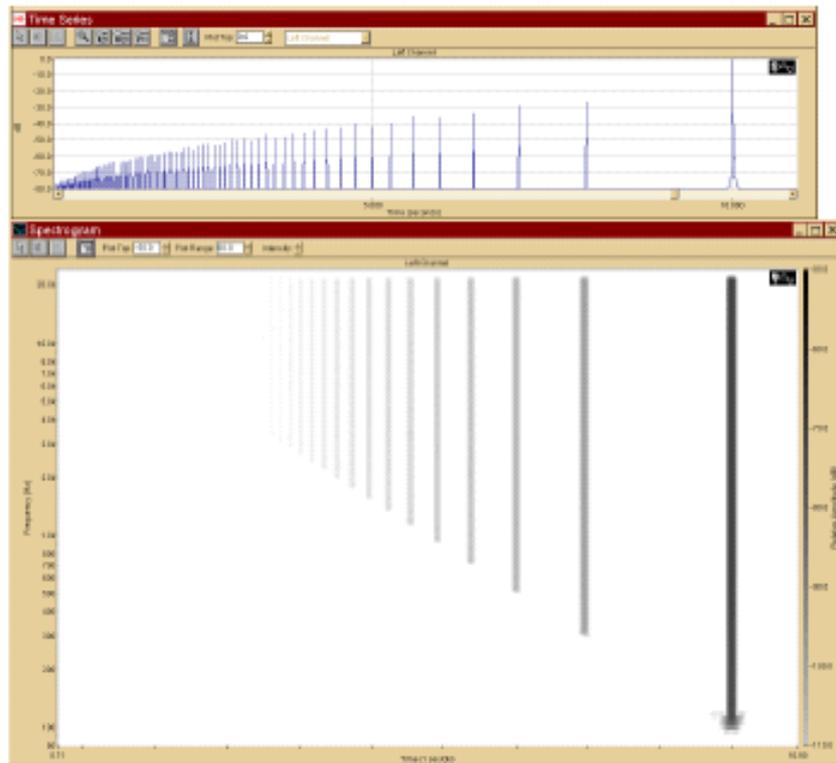


Figura 4.11: Deconvoluzione di un segnale di *swept sine* con in evidenza le risposte all'impulso ai vari ordini di distorsione armonica.

## 4.3 Strumentazione utilizzata

### 4.3.1 Sorgenti

Le rilevazioni sono state effettuate utilizzando due sistemi di diffusione differente:

- un sistema diffusore dodecaedrico/subwoofer;
- una cassa acustica direzionale.



Figura 4.12: Il dodecaedro *Omnisonic* utilizzato.

Il primo sistema è composto da una cassa con speaker in posizione dodecaedrica della *Omnisonic*, utilizzata allo scopo di avere un'emissione il più possibile uniforme sull'intero angolo solido; per migliorare ulteriormente l'effetto voluto ogni speaker è posizionato in una struttura concava che minimizzi i possibili effetti di cancellazione che possono provenire dall'interazione tra speaker adiacenti (cfr. fig. 4.12).

In aggiunta ad esso si è utilizzato un subwoofer della SIPE modello AB300 per incrementare la potenza del sistema sui bassi, che per il dodecaedro è

sicuramente insufficiente. In questo caso i problemi di direzionalità non si presentano perché le basse frequenze possono essere ben approssimate a sorgenti omnidirezionali. Il sistema comprende anche una scheda DSP (*Digital Signal Processor*) realizzante crossover ed equalizzazione del segnale in ingresso, che viene equalizzato per l'intero sistema subwoofer+dodecaedro. In fig.4.14 è visibile il segnale equalizzato proveniente dal sistema: esso risulta praticamente piatto nella banda di frequenze in esame, con graduale decremento a frequenze musicalmente meno importanti. È possibile notare come le frequenze di sovrapposizione tra la banda di competenza del dodecaedro e quella del subwoofer, rappresentate dalla zona tra i 60-120 Hz, mostrino comunque degli andamenti di emissione piuttosto altalenanti.

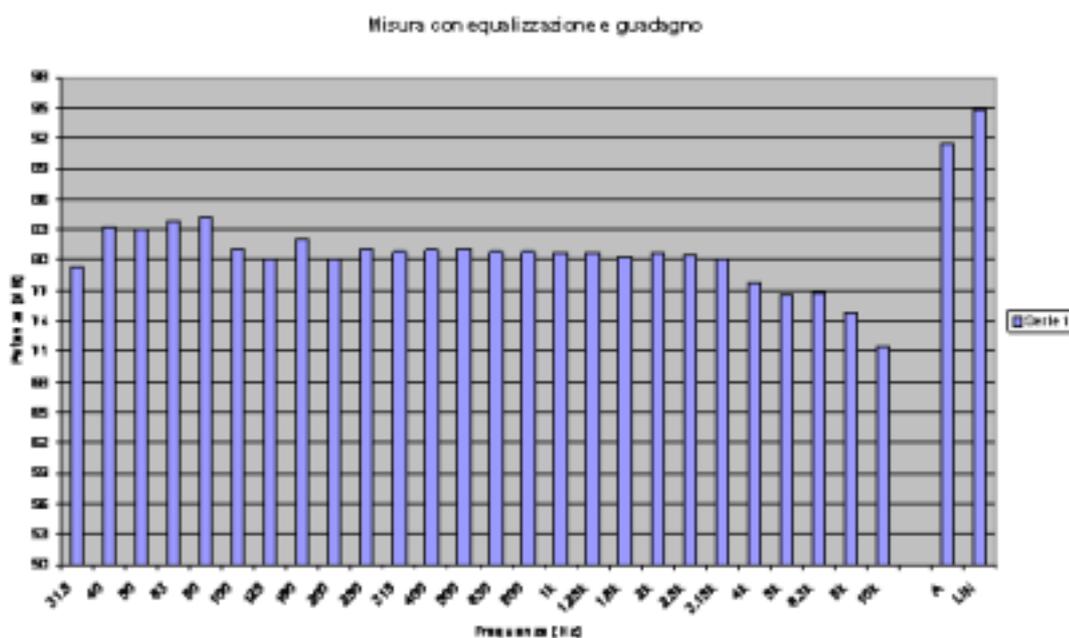


Figura 4.13: Spettro della potenza sonora del sistema equalizzato.

Il secondo sistema è stato usato per simulare la direzionalità della voce. La sorgente usata è una cassa *Genelec S30D*, avente in dotazione un'entrata digitale che minimizza il rumore dovuto al cablaggio; inoltre è dotata di una risposta in frequenza molto ampia e piatta, tale da rimanere entro 3 dB dal valore massimo in un intervallo tra i 35 Hz e i 50 KHz. Per questo motivo non è stata sottoposta a equalizzazione.

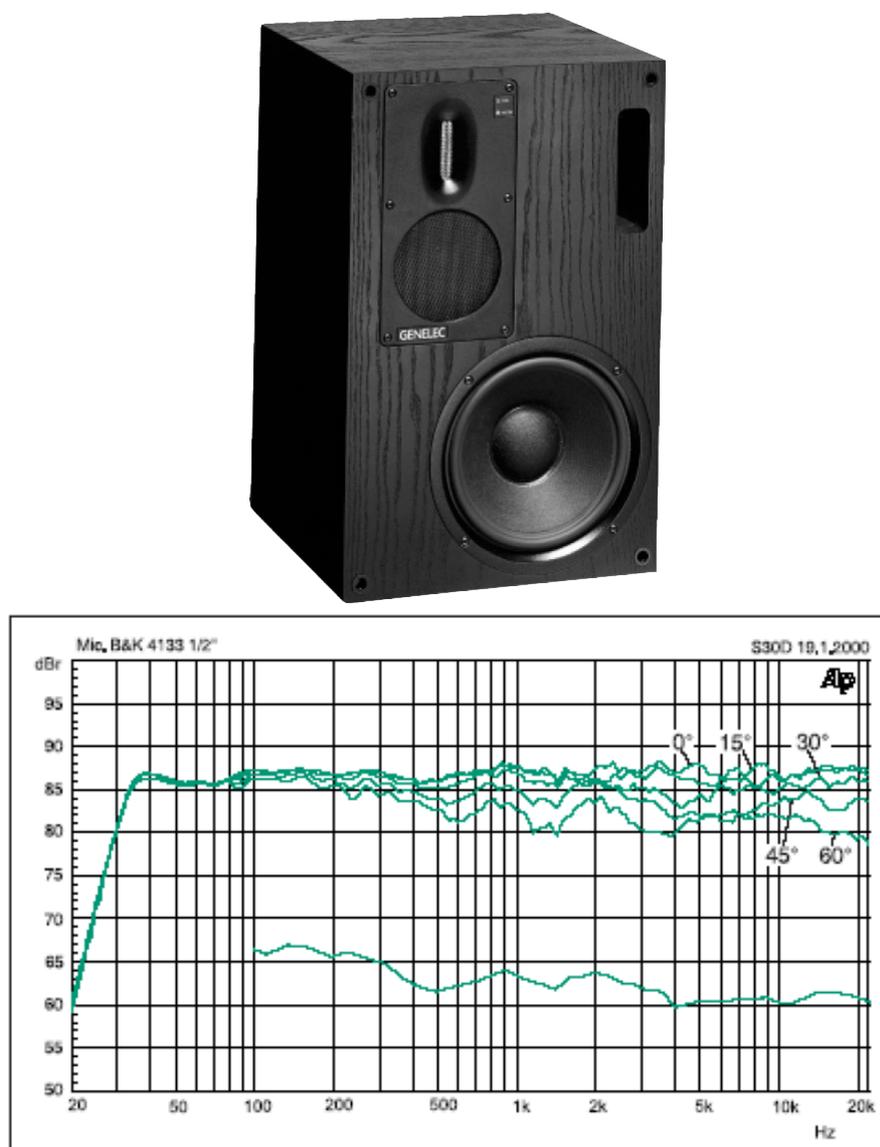


Figura 4.14: La cassa *Genelec* e, sotto, la sua risposta in frequenza. Le varie curve si riferiscono ai diversi angoli di misurazione della potenza sonora alla distanza di 1m.

### 4.3.2 Rilevatori

I rilevatori utilizzati in questa sede sono stati:

1. un microfono di tipo *Soundfield ST-250*, che consiste in un rilevatore di pressione/velocità consistente di quattro microfoni disposti in montaggio tetraedrico. Questo permette, mediante somme e sottrazioni nel tempo del segnale, di ottenere un segnale *W*, che si comporta da rilevatore di pressione e quindi funge da microfono omnidirezionale, e i tre segnali *X,Y,Z* (con *X* diretto verso il palco, *Y* verso i lati della sala e *Z* verso l'alto) che rappresentano rilevatori di velocità con figura direzionale "a forma di 8" lungo le tre direzioni degli assi cartesiani. L'insieme di questi segnali forma il cosiddetto segnale *B-format*. Conoscendo le risposte all'impulso nelle direzioni degli assi cartesiani, è possibile ottenere le risposte all'impulso in qualunque direzione sull'intero angolo solido mediante semplici calcoli vettoriali, e dunque ottenere un microfono virtuale con direzionalità a piacere;



Figura 4.15: Il microfono *Soundfield*, e a sinistra il montaggio delle membrane microfoniche.

2. una coppia di microfoni *Neumann KM-140* a cardioide (vale a dire con direzionalità a forma di cardioide, che non scende sotto i 3 dB rispetto al valore massimo entro un'apertura angolare di  $\pm\frac{3}{4}\pi$ ) disposti in configurazione ORTF, ovvero distanziati di 180 mm e formanti un angolo di 180°;
3. una testa artificiale binaurale *Neumann KU-100*, con all'interno due microfoni simili a quelli precedentemente descritti, con padiglioni inclusi. La sua funzione è quella di simulare al meglio la funzione di

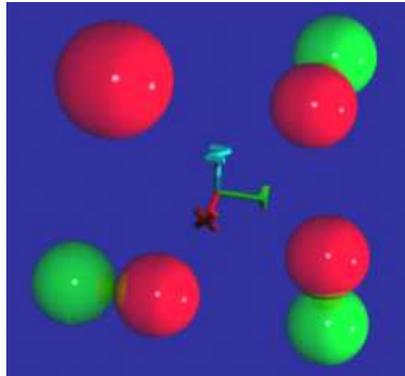


Figura 4.16: Direzionalità dei segnali *B-format* provenienti dal microfono *Soundfield*: in alto a sinistra è rappresentata la direzionalità del canale W.

trasferimento della testa, la quale allo scopo è costruita con materiali che hanno la stessa impedenza acustica di una testa umana reale.



Figura 4.17: Testa e microfoni Neumann

I microfoni sono installati su un piatto rotante; la configurazione prevede la testa montata sulla sommità di un supporto alto poco più di un metro, con i microfoni in posizione ORTF posti poco più in alto della testa e il microfono *Soundfield* a distanza di circa 1 m dall'asse del piatto; questo metodo di misurazione permette la misurazione dei parametri spaziali (IACC e LF

in particolare) al variare dell'angolo di rotazione, così da permettere una descrizione delle caratteristiche spaziali dell'ambiente in esame [28]. Il piatto si muove sull'angolo giro a passi di  $15^\circ$  per volta, per un totale di 24 risposte all'impulso ottenute per ogni punto di misura della sala.

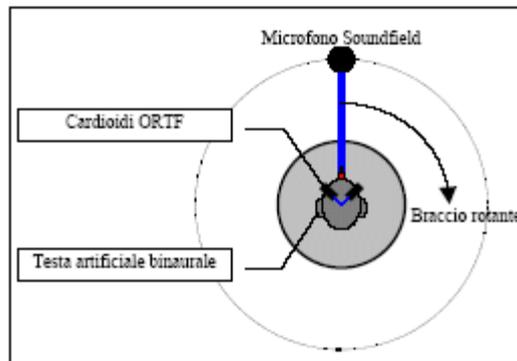


Figura 4.18: La configurazione dei microfoni vista dall'alto.



Figura 4.19: I microfoni e il piatto rotante

Oltre a questo primo sistema di misure, è stato utilizzato un registratore *DAT Sony TCD-D100* con microfonini *Sony DRW70C* per ottenere risposte all'impulso binaurali in maniera veloce in tutta la sala. Questo metodo di misura ovviamente non consente una descrizione spaziale del campo sonoro, ma è molto utile in quanto è un sistema rapido (i microfonini vengono infilati nelle orecchie, per cui è sufficiente spostarsi nella sala e registrare).



Figura 4.20: Il registratore *DAT Sony TCD-D100*.

### 4.3.3 Scheda audio

L'esigenza di utilizzare diverse tracce contemporaneamente (4 provenienti dal microfono *Soundfield*, 2 dai microfoni binaurali e 2 dai microfoni in configurazione ORTF, più quelle in uscita, ovvero una per alimentare il diffusore e una per comandare il piatto rotante), oltre all'esigenza di una registrazione a 96 KHz - 24 bits rende d'obbligo l'utilizzo di una scheda audio professionale esterna. La scheda utilizzata è una *Aadvark Pro Q10*, dotata di 8 ingressi e facilmente accessibile tramite un pannello di controllo software. Inoltre la scheda presenta anche un'uscita digitale, adottata in questo caso per l'alimentazione del *Genelec*.

### 4.3.4 Amplificatore

L'amplificatore utilizzato è un *Powermod Bi-Amp* da 450W. Esso non è mai stato commercializzato, per cui non è possibile disporre di specifiche dettagliate.

### 4.3.5 Software di misurazione e di acquisizione dei dati

Il software *Adobe Audition* è stato utilizzato per la misurazione in sala per la sua grande versatilità e potenza. Questo programma di elaborazione digitale professionale è infatti capace di gestire una quantità di tracce praticamente limitata soltanto dall'*hardware* del calcolatore, oltre ad essere in grado di lavorare a 32 bit e quindi di acquisire dinamiche a 24 bit come quelle utilizzate in queste misure, e di campionare a 96 KHz. All'interno del programma è stato sviluppato dal Prof. Angelo Farina un pacchetto di plug-in,



Figura 4.21: L'amplificatore Powermode utilizzato.

chiamato *Aurora*, perfettamente compatibile con *Adobe Audition* ed espressamente dedicato all'acustica architettonica. Tra le funzioni usate in questa tesi ricordiamo:

- la capacità di generare segnali di test usati in acustica architettonica: segnali MLS con registro a scorrimento di lunghezza regolabile, *sine sweep* sia lineare sia esponenziale di durata, ampiezza e intervallo di frequenza completamente personalizzabili;
- operatori di convoluzione tra segnali, per la deconvoluzione dei segnali acquisiti allo scopo di ottenere le risposte all'impulso e per la loro auralizzazione con segnali anecoici;
- strumenti di *cross-function* tra segnali;
- strumenti per la determinazione di filtri inversi di segnali e di appiattimento dello spettro (utilizzabili per l'equalizzazione dei sistemi di misura);
- moduli per la cancellazione dell'effetto di *cross-talk* (cfr. par. ??)
- possibilità di calcolo dei parametri acustici, e in particolare:

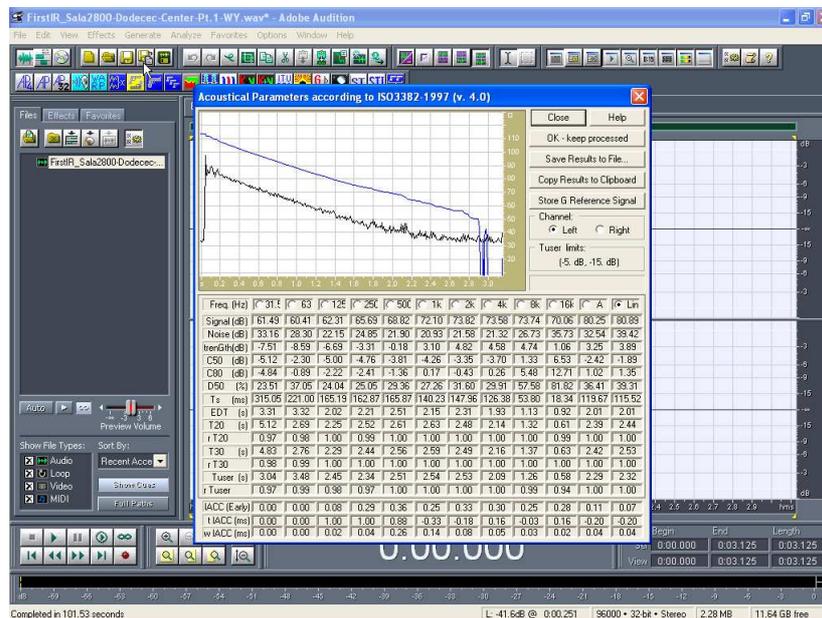


Figura 4.22: Il software Adobe Audition e i tool Aurora.

1. Tempi di riverberazione, in particolare  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , EDT e  $T_{user}$  con estremi personalizzabili;
2. tempo baricentrico  $t_s$ ;
3. indici definizione e di chiarezza  $D_{50}$ ,  $C_{50}$  e  $C_{80}$ ;
4. indice di potenza acustica G;
5. rapporto segnale/rumore;
6. calcolo dei parametri per la chiarezza del parlato STI e RASTI;
7. parametri spaziali come LE, LF, LFC con microfoni direzionali e IACC,  $\tau_{IACC}$  e  $W_{IACC}$ , questi ultimi ottenibili con intervallo di integrazione totale, riferito ai primi 80 ms od oltre gli 80 ms.

Inoltre tutti i parametri sono ottenibili in funzione della frequenza per bande d'ottava tra i 31,5 e i 16000 Hz, oltre che con filtri A e Lin (ricordiamo che il filtro A corrisponde ad una curva di ponderazione simile a quella caratteristica dell'orecchio umano, molto più sensibile alle medie frequenze piuttosto che alle medie od alle alte, mentre il filtro Lin non è un vero e proprio filtro in quanto la curva di ponderazione è piatta alle varie frequenze).

## 4.4 Modelli al calcolatore del campo sonoro

### 4.4.1 Introduzione

La descrizione analitica del campo sonoro in un ambiente chiuso è un'impresa ardua perché ci si trova in presenza di condizioni al contorno che impediscono di ottenere una soluzione esatta. Infatti, mentre in un luogo aperto la perturbazione sonora che è soluzione dell'equazione d'onda

$$\nabla^2 p + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 p = 0 \quad (4.13)$$

(dove  $p$  è la pressione nel mezzo,  $\omega$  è la frequenza e  $c$  è la velocità del suono nel mezzo) determina la formazione di semplici fronti d'onda piani, in un luogo chiuso l'impatto ripetuto dei fronti d'onda con mezzi materiali diversi dall'aria genera fenomeni di riflessione, di diffrazione, di interferenza etc.. . Considerando l'intervallo spettrale dei suoni percepiti dall'uomo in un intervallo di frequenza tra i 20 Hz e i 20 KHz (corrispondenti ad un intervallo di lunghezze d'onda all'incirca tra i 17 m e 17 mm) si vede come, a parte schematizzazioni matematiche estremamente semplificate come ad esempio si avrebbe in un parallelepipedo [3], la soluzione analitica del campo sonoro in un ambiente come una sala da concerto è praticamente impossibile. Per questo è d'obbligo ricorrere a delle approssimazioni. Inoltre quando parliamo di approssimazioni dobbiamo anche tener presente l'ambiente che stiamo considerando: infatti se le dimensioni dell'ambiente sono molto maggiori delle lunghezze d'onda in gioco allora possiamo approssimare le onde sonore ai soli fronti d'onda trascurando la loro fase, e quindi trascurando fenomeni di interferenza. Similmente all'ottica, quest'approssimazione è detta di acustica geometrica.

Se al contrario le dimensioni dell'ambiente sono confrontabili con le lunghezze d'onda in gioco non possiamo non considerare le caratteristiche ondulatorie del campo sonoro. Tra le tecniche numeriche che rendono possibile un calcolo approssimato del campo sonoro in piccoli ambienti ricordiamo il metodo degli elementi finiti (*Finite Elements Method*, FEM) e il metodo degli elementi di contorno (*Boundary Element Method*, BEM).

Il FEM è un metodo numerico di approssimazione dell'equazione delle onde e consiste nella divisione dell'ambiente modellizzato in parti piccole in rapporto alle lunghezze d'onda considerate e che vanno infittite nei siti di maggior curvatura della frontiera. Ciò comporta una quantità di elementi in gioco che esplode con l'aumento delle dimensioni del dominio, e quindi proibitivo in una sala da concerto, ma utilizzabile in ambienti di piccole dimensioni, come ad esempio per lo studio dei modi propri e delle frequenze di risonanza

all'interno di veicoli [29, 30].

Il BEM è un metodo numerico simile al precedente che però tiene in considerazione l'approssimazione della sola frontiera del dominio in studio. Questo metodo comporta quindi alcuni vantaggi rispetto al precedente per quel che riguarda ad esempio la modellizzazione di spazi aperti. Entrambe le tecniche sono comunque ancora poco utilizzate nell'ambito dell'acustica.

I metodi che usano l'approssimazione dell'acustica geometrica sono utilizzati per lo studio della propagazione acustica dei grandi spazi (sale da concerto, ma anche impianti industriali, commerciali e altro) e sono implementati in molti programmi commerciali; tra i tanti quelli più usati sono [31]:

- modelli statistici (come il modello del campo semiriverberante);
- la tecnica delle Sorgenti Immagine (*Image Source*);
- il *Ray Tracing*;
- le evoluzioni del *Ray Tracing*: modelli ibridi (*Ray Tracing* + Sorgenti Immagine), *Beam Tracing*, *Cone Tracing* e *Pyramid Tracing*.

#### 4.4.2 Modelli statistici: il campo semiriverberante

Il modello di campo semiriverberante è una estensione della formula di Sabine per valutare il livello sonoro (in dB) all'interno di un ambiente in modo semplice con una formula diretta:

$$L_s = L_W + 10 \log \left( S_0 \left( \frac{Q_\theta}{4\pi d^2} + \frac{4}{\sum_i \alpha_i S_i} \right) \right), \quad (4.14)$$

in cui  $L_s$  è il livello di pressione sonora nel punto in esame,  $Q_\theta$  è la direzionalità della sorgente (ovvero un valore tra 0 e 1 di potenza nella particolare direzione di osservazione),  $d$  è la distanza dalla sorgente in m,  $S_0$  è la superficie di riferimento pari ad  $1 \text{ m}^2$  e  $\alpha_i$  e  $S_i$  sono i valori del coefficiente di assorbimento sonoro e le aree delle superfici riflettenti. Affinché il livello sonoro calcolato con questa formula sia una buona stima di quello reale, però, l'ambiente in esame deve sottostare alle seguenti restrizioni:

- l'ambiente deve avere forma abbastanza regolare;
- le dimensioni dell'ambiente devono essere confrontabili fra di loro;

- le superfici presenti nell'ambiente devono permettere una diffusione abbastanza uniforme senza privilegiare particolari direzioni;
- la distribuzione di materiale fonoassorbente deve essere abbastanza uniforme nell'ambiente.

Risulta quindi con la formula del campo semiriverberante una buona descrizione del suono diretto, che ovviamente risulta sempre corretto, e dunque dà una buona stima del livello sonoro in prossimità della sorgente; allontanandosi dalla sorgente i risultati sono sempre meno buoni, in quanto questo metodo non tiene per nulla in conto la geometria del sistema.

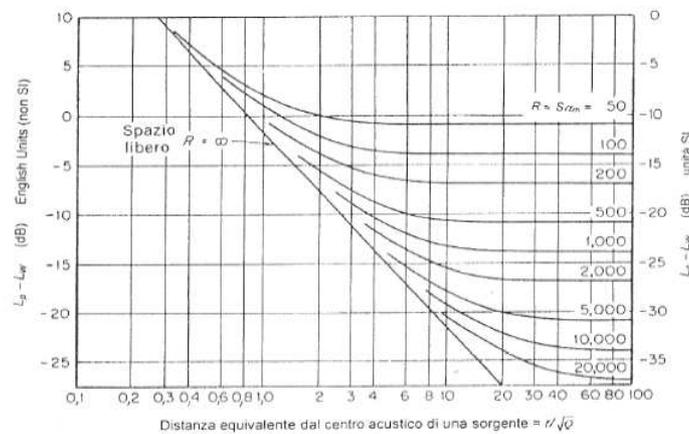


Figura 4.23: Livelli di intensità sonora all'interno di una camera semiriverberante.

### 4.4.3 Il metodo delle Sorgenti Immagine

Il metodo delle sorgenti immagine si basa sulle regole dell'acustica geometrica e consiste nella creazione di sorgenti sonore "virtuali" generate dalla riflessione della sorgente sonora reale con le pareti dell'ambiente. Queste sorgenti sonore virtuali consentono il riconoscimento dei punti sulle pareti in cui il raggio sonoro impatta per raggiungere il ricevitore. Dunque è possibile calcolare la distanza tra il ricevitore e le sorgenti virtuali ma anche il tempo di volo del raggio sonoro dalla formula, rendendo diretta quindi la ricostruzione della risposta all'impulso.

Calcolando dunque le posizioni delle sorgenti immagine il livello sonoro in dB del ricevitore sarà dato da:

$$L_p = L_W + 10 \log \left( \frac{Q_\theta \prod_i (1 - \alpha_i)}{4\pi d^2} \right), \quad (4.15)$$

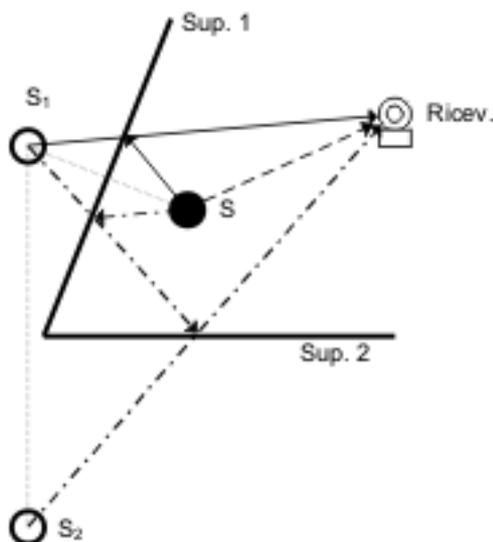


Figura 4.24: Illustrazione del metodo delle sorgenti immagine.

dove i simboli hanno lo stesso significato che nel parametro precedente mentre il pedice del coefficiente di assorbimento  $\alpha$  si riferisce alla parete su cui il raggio sonoro impatta; si intende che la superficie è ancora rapportata alla superficie di riferimento di  $1 \text{ m}^2$ , così che il termine contenuto nel logaritmo sia adimensionale. Se si vuole tenere in considerazione anche l'assorbimento dell'aria, bisogna moltiplicare all'interno del logaritmo per un fattore  $e^{-\beta d}$ , con  $\beta$  coefficiente di assorbimento. La costruzione può essere iterata facilmente fino ad ordini molto elevati. Se consideriamo una semplice stanza a forma di parallelepipedo, il numero delle sorgenti immagine sarà 6 al primo ordine, 30 al secondo, 150 al terzo e così via. Il viaggio dei raggi sonori viene seguito finché il livello diventa minore di un prefissato livello  $L_0$ , al di sotto del quale il raggio si estingue.

Numerosi sono però i problemi legati a questa tecnica: infatti se la stanza è di forma complessa come una sala d'ascolto, occorre inserire nel programma di calcolo degli algoritmi di test fra ciascuna sorgente immagine e ciascun ricevitore, per essere sicuri che il raggio riflesso colpisca il piano di ciascuna

parete interessata dalle riflessioni in un punto interno all'elemento di superficie stesso. Infatti si vede come, a fronte del test precedente, ben poche immagini su diverse centinaia di migliaia sopravvivono a formare il campo sonoro nella posizione di ricezione del segnale. Per ottenere una densità di energia accettabile, occorrerebbe un numero di sorgenti immagine talmente grande che anche un computer moderno impiegherebbe alcuni anni per ciascun ricevitore. Dunque questo metodo non viene usato a meno di non considerare ambienti di forma molto semplice.

#### 4.4.4 *Ray Tracing*

Il metodo del *Ray Tracing* può essere considerato un metodo di Montecarlo e si basa quindi su un concetto diverso: l'energia irradiata dalla sorgente sonora viene quantizzata e "sparata" nello spazio in un gran numero di direzioni che possono essere scelte casualmente o deterministicamente secondo un algoritmo di divisione dell'intero angolo solido. Per entrambe le scelte esso è un problema non banale, e specialmente per il primo caso, in quanto la convergenza all'uniformità può essere anche molto lenta.

I ricevitori in questo caso non sono però dei punti bensì dei volumi (quasi

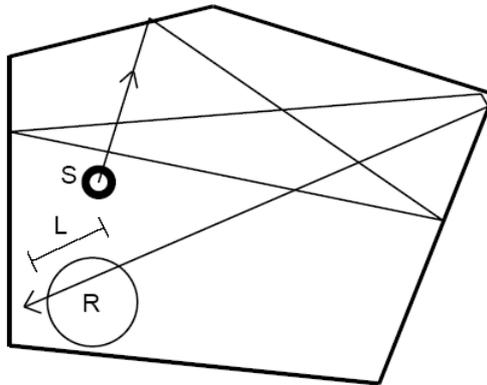


Figura 4.25: Percorso di un raggio sonoro fino al ricevitore nel *Ray Tracing*; si noti come l'energia depositata nel ricevitore aumenti all'aumentare del suo diametro.

sempre sfere), altrimenti la probabilità che un raggio intercetti il ricevitore sarebbe 0. La densità di energia  $D$  (in  $J/m^3$ ) che ogni raggio cede al ricevitore al suo passaggio è data dalla formula:

$$D = e^{-\beta r} \frac{EL}{V} \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (4.16)$$

dove  $r$  è la distanza percorsa dalla sorgente,  $V$  il volume della sala,  $L$  il segmento del raggio che interseca il ricevitore (come in fig. 4.25),  $\alpha_i$  il coefficiente di assorbimento della superficie  $i$ -esima con cui il raggio ha impattato e  $E$  l'energia per metro di lunghezza trasportata dal raggio, calcolata come:

$$E = \frac{WQ_\theta}{Nc_0} \quad (4.17)$$

con  $W$  e  $Q_\theta$  rispettivamente potenza e direzionalità della sorgente,  $N$  numero dei raggi in cui la sua potenza è stata divisa e  $c_0$  velocità del suono. Tra gli inconvenienti di questo metodo ricordiamo che, se vogliamo avere una buona stima del campo sonoro in un punto con questo metodo, esso deve venire irraggiato sufficientemente spesso. Questo vuol dire che, se ad esempio volessimo seguire la coda sonora per almeno 2 secondi, i raggi avrebbero percorso un tragitto di  $c_0 t \simeq 680m$ , coprendo una superficie di  $4\pi 680^2 m^2$ . Se il nostro ricevitore ha area  $\pi m^2$ , c'è una probabilità su 1849600 che esso sia investito da un raggio, e quindi ci sarebbe bisogno di lanciare parecchi milioni di raggi affinché esso sia colpito da alcuni di essi. In realtà se consideriamo il campo abbastanza diffuso, i contributi energetici dei raggi che arrivano al termine della coda riverberante saranno simili tra di loro, rispettando le regole dell'acustica statistica. Dunque sarà importante che arrivino anche pochi raggi, ma ben distribuiti nel tempo. Comunque il numero di raggi da lanciare non può essere inferiore ad alcune decine di migliaia. Un'altro problema che incontra questa tecnica è quello della criticità delle caratteristiche del ricevitore, in quanto il risultato sarà fortemente dipendente:

1. dalla dimensione del ricevitore, in quanto
  - se il ricevitore è troppo grande potrebbe essere sovrastimato il contributo di ogni captazione, per non parlare dello scarso realismo del modello con un rilevatore enorme che attinge energia in una zona troppo estesa,
  - se è troppo piccolo potrebbe non ricevere un numero adeguato di raggi;
2. dalla posizione del ricevitore, in quanto soggetto a forti variazioni di captazione per piccoli spostamenti (cfr. fig. 4.26).

Per ovviare a questi inconvenienti si può usare la formula di Lehnert per il calcolo del raggio del ricevitore che minimizza gli errori detti precedentemente; la formula è la seguente:

$$r_m = R_0 \sqrt{\frac{2\pi}{N}} \quad (4.18)$$

dove  $R_0$  è il raggio di estinzione e  $N$  il numero di raggi. In alternativa si può includere nel programma stesso un algoritmo di correzione del raggio del ricevitore che lo ingrandisca in caso di scarsa captazione.

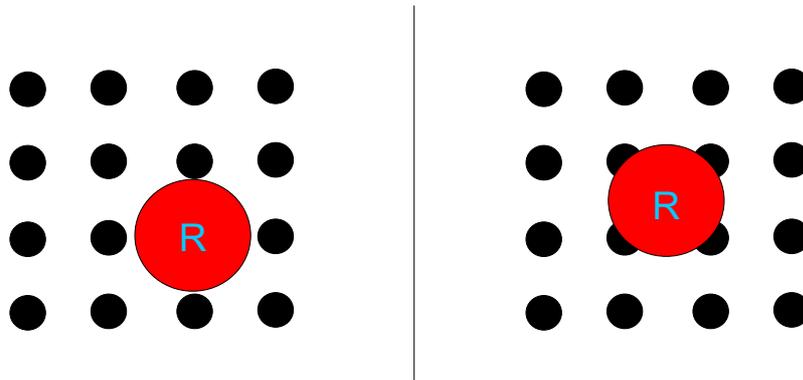


Figura 4.26: Sensibilità della posizione rispetto al numero di raggi captati.

#### 4.4.5 Evoluzioni del *Ray Tracing*

Il primo tentativo di miglioramento del *Ray Tracing* è dovuto a Vorlander [32], il quale elaborò un modello ibrido *Ray Tracing/Sorgenti Immagine*, allo scopo di alleggerire il calcolo dei test di visibilità, il maggior problema nel metodo delle Sorgenti Immagine. In questo modello il tracciamento di raggi serve semplicemente a identificare le superfici capaci di generare una sorgente immagine valida: il ricevitore è una sfera di raggio finito, allo scopo di intercettare i raggi provenienti dalla sorgente sotto forma di *Traced Rays*. Una volta identificati questi raggi, si torna indietro utilizzando per queste stesse superfici il metodo delle sorgenti immagine, e il ricevitore torna ad essere puntiforme. Il test di visibilità deve essere ancora effettuato, ma in questo modo risulta positivo per un numero molto maggiore di casi rispetto al modello delle sorgenti immagine.

Per ovviare all'inconveniente, molto frequente, che lo stesso percorso di riflessione generi più sorgenti immagine, come può accadere spesso per le prime riflessioni se i raggi sono molto fitti, si ricorre ad uno schema dati ad albero, sui cui rami siano rappresentati gli impatti con le superfici, come in fig. 4.27.

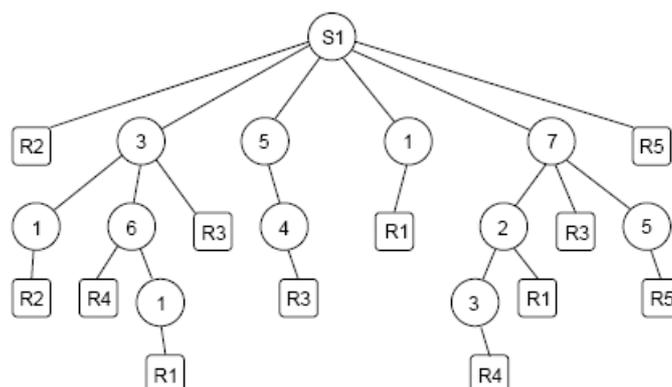


Figura 4.27: Schema dati ad albero nel metodo di Vorlander.

Persiste comunque il problema della velocità di calcolo, tanto che è difficile superare il  $10^2$ - $10^3$  ordine di riflessione. Inoltre la coda sonora non può essere valutata, come nel caso del *Ray Tracing* puro, usando le leggi dell'acustica statistica, in quanto la perdita di raggi in questo caso non viene compensata dal fatto che i raggi esistenti possiedono una maggiore energia come nel *Ray Tracing*, sottostimando così il valore del livello sonoro.

Un'ulteriore evoluzione è stata ispirata da tentavi di allargamento del raggio del ricevitore, idea già espressa nel paragrafo precedente, ma con fini diversi. Infatti, mentre nel metodo del *Ray Tracing* puro l'allargamento del ricevitore aveva il solo scopo di approssimare meglio la coda sonora, in questo caso l'allargamento stesso avviene in maniera costante; la divergenza sferica dei raggi cresce di pari passo con l'allargamento della sorgente, in modo che il rapporto tra le aree resti costante. Questo prevede però che il raggio del ricevitore cresca in maniera spropositata, diventando più grande dell'ambiente stesso, finendo per ricevere energia qualunque sia il percorso del raggio.

Un altro modo per ottenere un effetto simile è quello di considerare settori di sfera divergenti invece di raggi. Il ricevitore torna ad essere puntiforme, in quanto riceverà un impulso sonoro ogni volta che esso viene a trovarsi all'interno del volume divergente spazzato dalla sorgente. La traiettoria dei settori viene comunque calcolata da un raggio centrale, che ad ogni impatto con una superficie verrà riflesso specularmente secondo le leggi dell'acustica geometrica; molti di questi modelli utilizzano poi un codice che definisce le sorgenti immagine per calcolare il livello sonoro.

Questo procedimento porta a errori nella coda riverberante, in quanto quando il fascio diventa grande rispetto alle superfici, esso sperimenta una perdita di sorgenti immagine. La situazione è ben evidente nelle fig. 4.28; il processo genera sempre una sottostima della coda, come dimostrato da Maercke e Martin [33]. Questo aspetto sarà approfondito nel prossimo paragrafo.

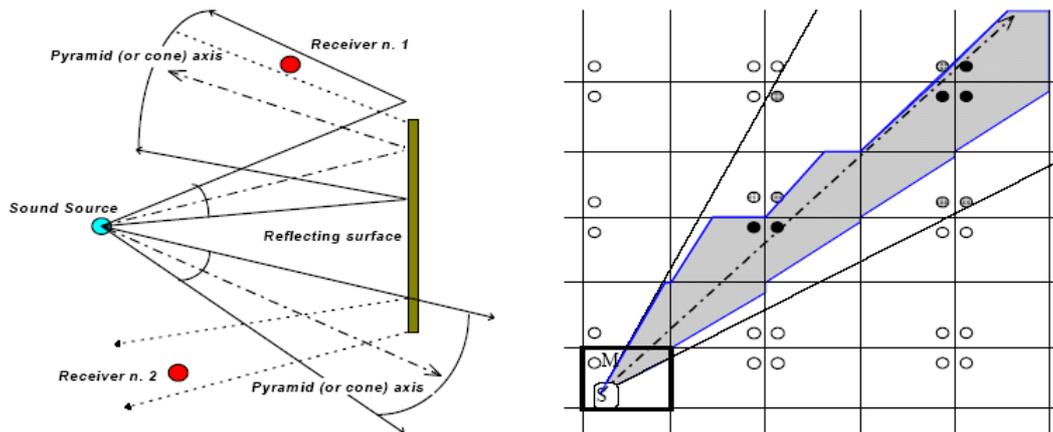


Figura 4.28: Perdita di sorgenti immagine: nella figura di sinistra si vede come il ricevitore 2 non venga irraggiato per effetto della riflessione del solo asse centrale; nella figura di destra la perdita di sorgenti immagine valide è evidente.

Per i metodi di *tracing* sono state usate figure divergenti diverse; tra esse ricordiamo:

- il **Cone Tracing**, in cui la sorgente viene divisa in cerchi che allontanandosi dalla sorgente stessa formano dei coni; i coni non coprono però alla perfezione la superficie di una sfera, in quanto se essi sono adiacenti risulteranno dei buchi nella copertura della superficie sferica; laddove, nel caso essi siano parzialmente sovrapposti, allo scopo di non lasciare spazi vuoti, se il ricevitore si trova nel punto d'intersezione tra due coni esso riceverà un contributo energetico doppio rispetto al reale. (cfr. fig. 4.29). Ciò implica che il programma debba prevedere algoritmi che individuino i coni sovrapposti e dimezzino l'energia nel caso incontrino un ricevitore, una procedura onerosa per l'uso di memoria e di tempo di calcolo;
- il **Beam Tracing**, in cui il fascio è sostituito da una distribuzione di energia che varia con legge gaussiana a seconda dell'angolo  $\theta$  rispetto al raggio usato come asse:

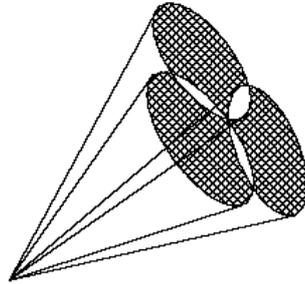


Figura 4.29: Sovrapposizione tra coni nel metodo del *Cone Tracing*.

$$I(\theta) = \alpha \text{Exp}\left(-\frac{\beta\theta^2}{2}\right) \quad (4.19)$$

in questo modo i fasci sono ancora sovrapposti, ma l'intensità energetica si riduce di parecchio negli interstizi tra due raggi vicini. In questo modo si può ottenere una distribuzione di energia abbastanza uniforme (cfr. fig. 4.30);

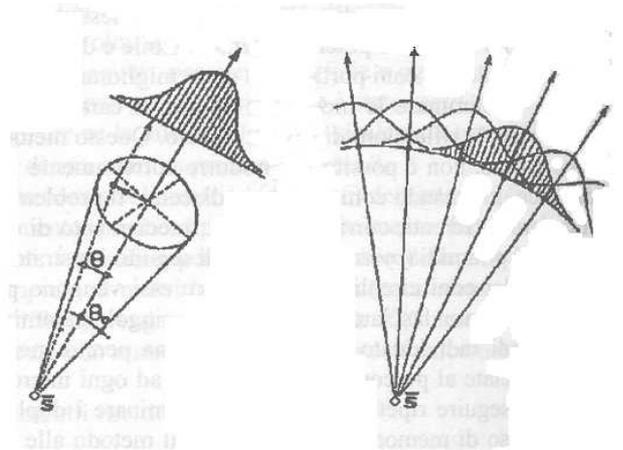


Figura 4.30: Illustrazione del metodo del *Beam Tracing*; i fasci d'intensità hanno una distribuzione gaussiana.

- il ***Pyramid Tracing***, che è il metodo usato nel programma *Ramsete* (ideato dal Prof. Farina e altri [34]) utilizzato in questa tesi di laurea e sarà ampiamente descritto nel prossimo paragrafo.

#### 4.4.6 *Pyramid Tracing*

Nel *Pyramid Tracing* la sorgente viene divisa in triangoli curvilinei mediante l'algoritmo di Tenenbaum (1992); l'algoritmo prevede una progressiva bisezione della sfera a partire dagli 8 ottanti generati dai piani cartesiani. Il numero di piramidi sarà pertanto sotto forma di potenze di 2:  $N_p = 8 * 2^N$  con  $N$  ordine di bisezione. Le direzioni di emissione delle piramidi dunque vengono scelte per via deterministica, evitando problemi di convergenza statistica tipiche di alcuni algoritmi di distribuzione dei raggi pseudocasuali di *Ray Tracing*.

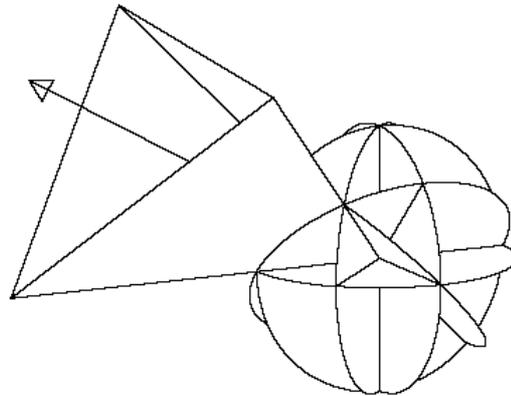


Figura 4.31: Generazione di piramidi mediante l'algoritmo di Tenenbaum.

La procedura permette di ottenere una divisione perfettamente isotropa della sorgente, oltre a minimizzare i problemi di sovrapposizione dei fasci incontrati con il *Cone Tracing* e con il *Beam Tracing*; piccoli problemi residui, legati alla precisione limitata del calcolatore, possono portare alla presenza di buchi nella propagazione delle piramidi. Per ovviare a questo inconveniente si sovrappongono leggermente le frontiere delle piramidi per un'estensione in lunghezza pari a  $2\epsilon$ , come in figura 4.32. Ciò comporta però la ricezione di un doppio contributo energetico nel caso che il ricevitore si trovi esattamente nella zona di sovrapposizione delle due piramidi, e ciò può condurre a una sovrastima particolarmente importante nell'onda diretta. Il programma rimedia a questo errore ignorando un contributo energetico se arriva nello stesso *slice* temporale di un'altro: dunque, per evitare questo errore sistematico, è preferibile usare una risoluzione abbastanza elevata, preferibilmente minore di 50 ms.

Il raggio rappresentante la propagazione delle piramidi viene individuato dalla congiungente dei baricentri dei triangoli con il centro della sorgente;

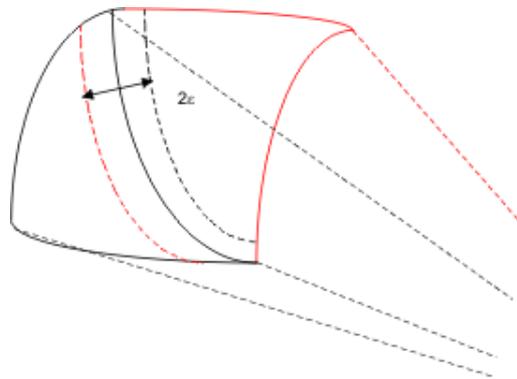


Figura 4.32: Sovrapposizione di piramidi.

essi viaggeranno alla velocità del suono attraverso l'ambiente riflettendosi specularmente sulle superfici.

L'individuazione dei punti d'impatto è la procedura più onerosa in termini di tempo di calcolo; si tratta infatti di verificare le condizioni di intersezione tra tutte le piramidi in gioco con tutte le superfici, andando ad individuare quella con cui il raggio effettivamente impatta; questa procedura è rappresentata nella fig.4.34 sotto forma di grafo di flusso; i passaggi logici sono i seguenti:

1. dal disegno 3D in CAD vengono identificati i vertici di tutte le superfici presenti; da essi vengono calcolati i parametri dell'equazione generica del piano  $ax + by + cz + d = 0$ . Questa operazione viene effettuata all'inizio, prima ancora della divisione della sfera in triangoli.
2. Se identifichiamo con  $(x_0, y_0, z_0)$  il punto di partenza, che può essere la sorgente o il punto dell'ultimo impatto subito, e con  $\alpha, \beta$  e  $\gamma$  i coseni direttori del raggio, la traiettoria del raggio stesso sarà in forma parametrica:

$$x = x_0 + \rho\alpha, \quad y = y_0 + \rho\beta, \quad z = z_0 + \rho\gamma; \quad (4.20)$$

dove  $\rho$  è ottenibile dall'equazione:

$$a(x_0 + \rho\alpha) + b(y_0 + \rho\beta) + c(z_0 + \rho\gamma) + d = 0 \quad (4.21)$$

e rappresenta la distanza percorsa dal raggio.

3. Una prima selezione è data dalla condizione di parallelismo: infatti se  $a\alpha + b\beta + c\gamma = 0$  allora la superficie verrà scartata in quanto parallela al raggio. In caso contrario viene calcolato  $\rho$  dalla formula 4.21.

4. Una seconda selezione viene data dal valore assoluto di  $\rho$ : se esso sarà negativo, vuol dire che il raggio si sta allontanando dalla superficie e quindi non impatterà con essa.
5. A questo punto il programma provvede ad un controllo sommario che permette di scartare quasi tutte le superfici rimanenti: una volta individuato il punto d'intersezione, verrà verificato se esso soddisfa le seguenti condizioni:

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (4.22)$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max} \quad (4.23)$$

$$z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4.24)$$

in cui  $x_{min}, y_{min}$  e  $z_{min}$  rappresentano i minimi delle coordinate dei vertici della superficie in esame, mentre  $x_{max}, y_{max}$  e  $z_{max}$  ne rappresentano i massimi (in cui viene rispettivamente sottratto e aggiunto un  $\epsilon$  per evitare errori di troncamento). Ciò corrisponde in pratica a verificare l'appartenenza del punto di intersezione al parallelepipedo individuato dagli estremi della superficie.

6. Controllo se la superficie ha i tutti i lati paralleli agli assi cartesiani, in quanto in questo caso il parallelepipedo degenera nella superficie stessa;
7. A questo punto si effettua un controllo rigoroso di confronto di aree allo scopo di constatare l'appartenenza del punto d'intersezione alla superficie data. Calcolate le aree  $A_{1-2}, A_{2-3}, A_{3-4}$  ed  $A_{4-1}$  ottenute congiungendo il punto d'intersezione con i vari punti della superficie, si verifica se vale la relazione:

$$A_{1-2} + A_{2-3} + A_{3-4} + A_{4-1} \leq A_{sup} + \epsilon \quad (4.25)$$

dove  $A_{sup}$  è l'area della superficie e  $\epsilon$  viene aggiunto per evitare errori di troncamento.

Alla fine della procedura la superficie con il valore di  $\rho$  più basso sarà quella su cui effettivamente impatta il raggio sonoro e su cui esso sarà riflesso.

Possono presentarsi però due situazioni anomale:

- non si è verificato alcun impatto valido;
- si è verificato un impatto al confine tra due o più superfici.

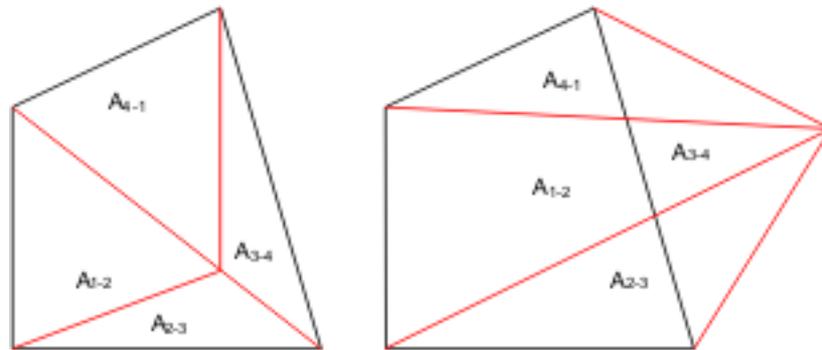


Figura 4.33: Controllo rigoroso di appartenenza alla superficie.

Nel primo caso la spiegazione è dovuta al fatto che il raggio evidentemente è sfuggito a causa di piccoli buchi nel progetto CAD. Il raggio fuoriesce allora dall'ambiente e continua la sua corsa indisturbato. Questo errore è più frequente in casi di disegno particolarmente complesso come la sala Santa Cecilia.

Nel secondo caso, il punto d'impatto del raggio è condiviso da più di una superficie. Ciò è possibile perché se il punto d'impatto è distante meno del valore di  $\epsilon$  utilizzato nel controllo rigoroso dell'impatto, esso viene riconosciuto come valido per entrambe le superfici. Questo "errore" può essere di due specie:

- errore di spigolo, in cui il punto d'impatto è in comune con due sole superfici. In tal caso il programma provvede a riflettere il raggio su entrambe le superfici;
- errore di vertice, in cui il punto è in comune con tre superfici. Il programma non cambia la direzione del raggio ma soltanto il verso.

Ovviamente durante il loro percorso le piramidi possono intercettare dei ricevitori. La procedura per la verifica è la seguente: si calcola la congiungente dell'ultima sorgente immagine con il ricevitore, si calcola il piano ortogonale ad essa e passante per il ricevitore e si calcola il cerchio circoscritto al triangolo di intersezione tra la piramide e il piano. Se il punto è esterno sicuramente il raggio non incontrerà il ricevitore, altrimenti occorre effettuare il test delle aree per appurarne l'appartenenza alla piramide.

Per quel che riguarda il contenuto energetico delle piramidi, esso diminuirà nel tempo per diverse cause:

- divergenza sferica;

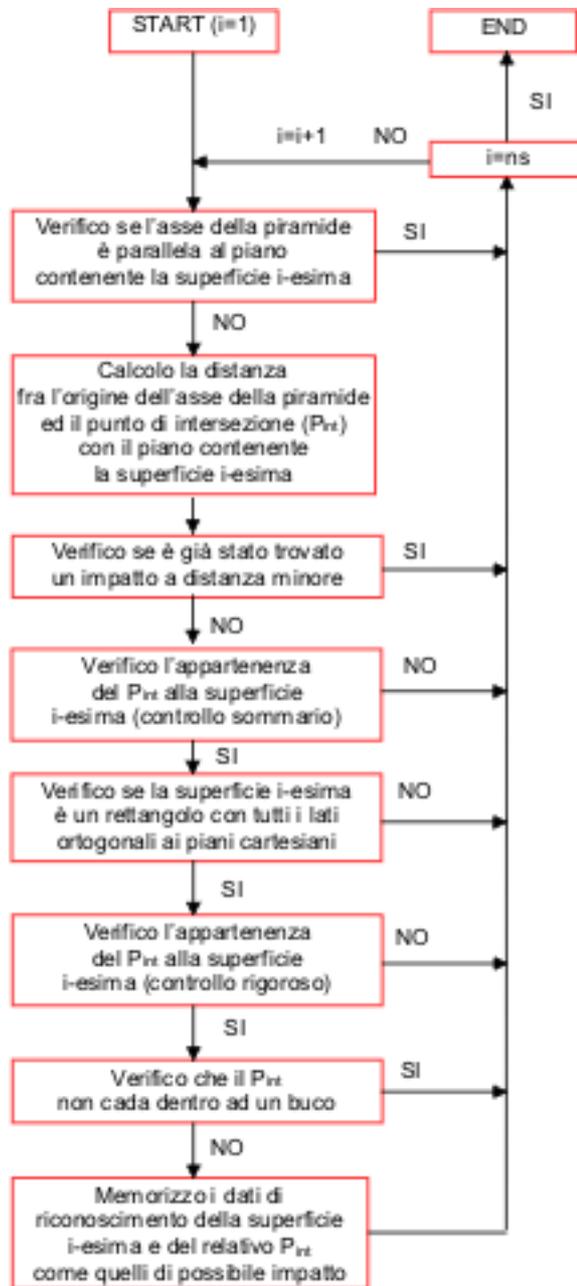
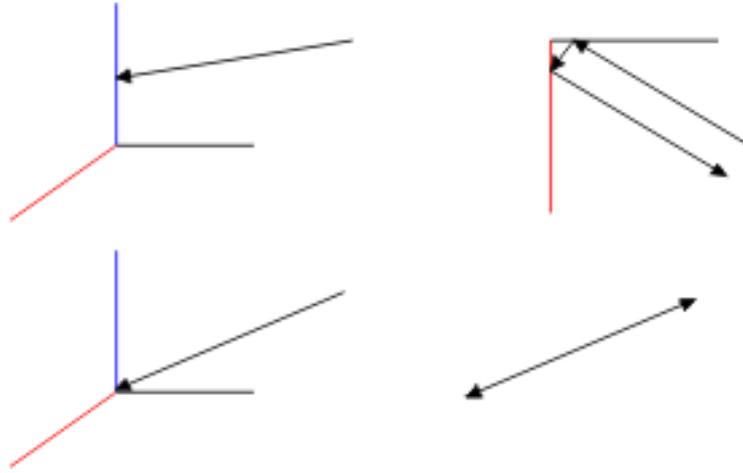


Figura 4.34: Grafo di flusso della routine di ricerca delle superfici d'impatto.



- attenuazione dell'aria;
- impatti con le pareti;
- eventuale trasmissione da pareti *obstructing*.

Dunque, chiamando il livello sonoro alla sorgente  $L_W$  e la direzionalità della sorgente stessa  $Q_\theta$ , il livello sonoro (in dB) sperimentato dal ricevitore sarà dato dalla formula:

$$L_i = L_W + 10\log Q_\theta + A_p + A_\beta - 10\log \frac{4\pi r^2}{S_0} \quad (4.26)$$

in cui:

- l'ultimo termine rappresenta la divergenza sferica ( $S_0$  rappresenta sempre la superficie di riferimento di  $1 \text{ m}^2$ );
- $A_\beta$  è la perdita di energia attraverso l'aria, data dalla formula empirica (in dB) [35]:

$$A_\beta = 1.7 \frac{f^2 r}{\Upsilon} 10^{-8} \quad (4.27)$$

in cui  $f$  è la frequenza centrale di banda,  $r$  la distanza percorsa e  $\Upsilon$  l'umidità relativa in percentuale;

- $A_p$  è la perdita di intensità sonora per impatto con le pareti e sarà dato dalla formula:

$$A_p = 10\log \prod_i (1 - \alpha_i) \quad (4.28)$$

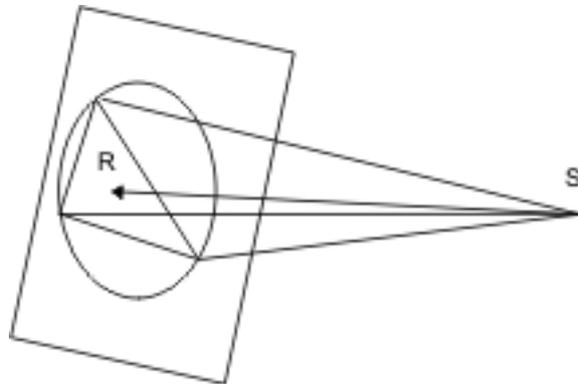


Figura 4.35: Verifica dell'intercettazione di una piramide da parte di un ricevitore.

(in cui ricordiamo che gli  $\alpha_i$  saranno funzione della banda di frequenza in esame);

Il raggio si considera estinto al termine della durata del tempo di volo scelto dall'utente. Ogni volta che una piramide incontra un ricevitore, quest'ultimo ne registrerà l'energia in funzione della banda di frequenza; la risposta all'impulso sarà rappresentata da una matrice di 10 colonne (rappresentanti le bande di frequenza dai 31,5 ai 16000 Hz) per alcune centinaia o migliaia di righe, ciascuna delle quali rappresentante un intervallo temporale rispetto all'istante iniziale. Ovviamente il numero di righe della matrice crescerà al crescere della durata della risposta all'impulso e della risoluzione temporale, entrambi impostabili dall'utente.

Si è visto nel paragrafo precedente come i metodi di *Beam Tracing*, tra cui anche il *Pyramid Tracing*, sottostimino la coda riverberante per effetto della perdita di sorgenti immagine valide (anche solo parzialmente). In un regime "sabiniano" (ovvero perfettamente diffuso) il numero di impatti giungenti ad un ricevitore nell'unità di tempo sarà dato dalla formula:

$$n(t) = \frac{4\pi c_0^3 t^2}{V} \quad (4.29)$$

con  $c_0$  velocità del suono e  $V$  volume dell'ambiente. Nel programma questo valore viene considerato rispettato finché i triangoli delle piramidi restano piccoli rispetto alle dimensioni delle superfici della sala; quando ciò non accade (in particolare alla fine della coda riverberante, quando i triangoli diventano anche più grandi dell'intero ambiente), il numero di impatti nell'unità di

tempo tenderà al contrario ad un valore costante dato dalla formula:

$$\lim_{n \rightarrow \infty}(t) = \frac{c_0 N}{l_m}. \quad (4.30)$$

in cui  $N$  è il numero di piramidi tracciate e  $l_m$  è il cammino libero medio di un raggio nella sala in esame; se consideriamo che in un ambiente perfettamente diffuso esso vale:

$$l_m = \frac{4V}{S_t}, \quad (4.31)$$

formula derivata dalla teoria cinetica dei gas [3] e in cui  $S_t$  rappresenta la superficie totale dell'ambiente, possiamo introdurre il tempo critico  $t_c$ , che rappresenta l'ideale separazione tra la prima parte della coda sonora e la seconda (di cui si sottostima il livello) e dato dalla formula:

$$t_c^2 = \frac{N S_t}{16\pi c_0^2} \quad (4.32)$$

data dalla combinazione delle formule 4.29 e 4.30. Introducendo il parametro adimensionale  $\beta$  dato da:

$$\beta = \frac{4\pi l_m^2}{S_t} \quad (4.33)$$

si ottiene:

$$t_c^2 = \frac{N l_m^2}{4\beta c_0}. \quad (4.34)$$

La formula 4.34 è preferita alla formula 4.32 poiché le quantità in essa contenute sono tutte note:  $N$  è il numero di piramidi preimpostato,  $c_0$  è la velocità del suono, mentre  $l_m$  è calcolato dal programma mediando volta per volta il percorso degli assi delle piramidi:

$$l_m = \frac{\sum_{i,j} l_{i,j}}{\sum_{i,j} n_{i,j}} \quad (4.35)$$

in cui  $l_{i,j}$  rappresenta la lunghezza della traiettoria percorsa dal raggio  $i$ -esimo al rimbalzo  $j$ -esimo, mentre  $n$  conta semplicemente il numero dei rimbalzi di tutti i raggi. Il parametro  $\beta$  dipende dalla forma della sala e non dalle sue dimensioni e rappresenta la "sabinianità" della sala: il valore preimpostato è 0.3, corrispondente ad una sala a regime diffuso. Dunque secondo la teoria di Maercke-Martin [33] si ottiene che il numero di impatti su un ricevitore sarà dato dalla formula:

$$n(t) = \frac{4\pi c_0^3 t^2}{V} (1 - e^{-\frac{l_m^2 N}{4\beta c_0^2 t^2}}) = \frac{4\pi c_0^3 t^2}{V} (1 - e^{-\frac{t_c^2}{t^2}}). \quad (4.36)$$

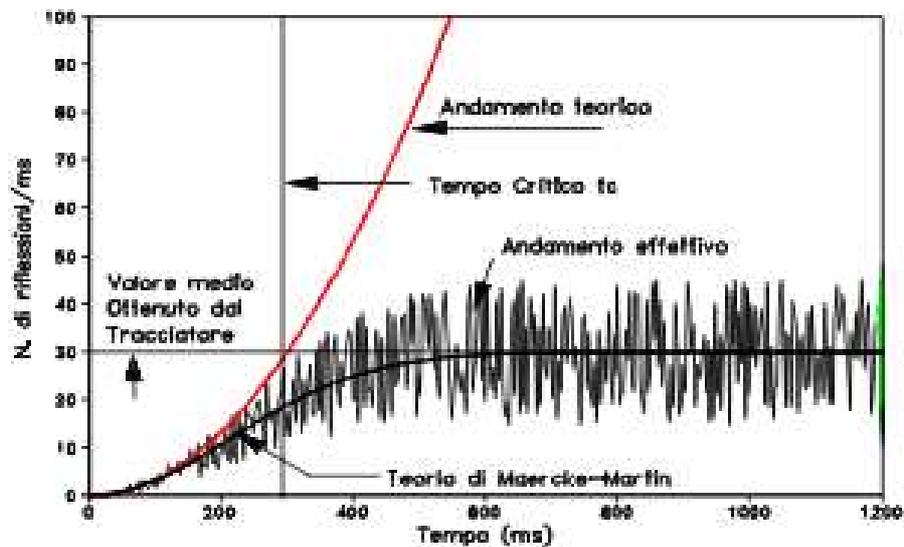


Figura 4.36: Andamento teorico, reale e della formula di Maercke - Martin del numero di impatti nel tempo.

La modifica della coda sonora può avvenire con correzione additiva o moltiplicativa. *Ramsete* usa la correzione moltiplicativa allo scopo di mantenere ogni ricevitore diverso dagli altri e di evitare discontinuità nel livello sonoro; ovviamente il fattore moltiplicativo è il reciproco del fattore correttivo della formula 4.36, ovvero:

$$\kappa = (1 - e^{-\frac{t^2}{\tau^2}})^{-1}. \quad (4.37)$$

La formula teorica del campo riverberante ha spesso una scarsa attinenza con la realtà; un'ulteriore miglioramento della stima della coda riverberante può quindi essere attuata rendendo variabile l'esponente del fattore  $\kappa$ ; dunque una formula più generica sarà data da:

$$\kappa_\alpha = (1 - e^{-\frac{t^\alpha}{\tau^\alpha}})^{-1}. \quad (4.38)$$

Ricordiamo che comunque l'effetto di  $\alpha$  e di  $\beta$  è inversamente proporzionale al numero di piramidi sparate. Inoltre è possibile utilizzare il valore della deviazione standard sul cammino libero medio, calcolato anch'esso dal programma, per avere ulteriori indicazioni sulla "sabinianità della sala: infatti a parità di cammino libero medio una sala con maggiore o minore valore di deviazione standard riflette la presenza o meno di anfratti, doppie cavità, etc. e quindi con caratteristiche più marcatamente non "sabiniane.

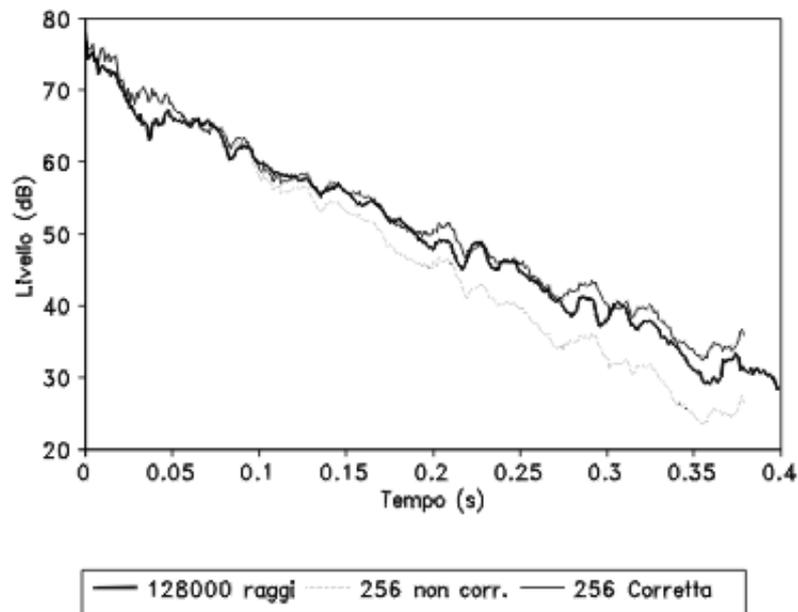


Figura 4.37: Risposte energetiche all'impulso usando 256 piramidi senza correzione ( $\beta = 0$ ), con correzione ( $\beta = 0.3$ ) e usando un grande numero di piramidi.

#### 4.4.7 Il programma *Ramsete*

Il programma *Ramsete* usato in questa tesi di laurea si divide in sottoprogrammi, ciascuno dei quali si occupa di un aspetto della simulazione. Essi sono:

1. ***Ramsete CAD***, ovvero un programma di disegno CAD per la costruzione delle sale. Esso può importare progetti da altri programmi di grafica (*AutoCAD*), a patto che il progetto sia stato interamente realizzato disegnando soltanto le superfici esterne con entità adatte (*3DFaces*), e inoltre serve per la sistemazione dei ricevitori e delle sorgenti all'interno della sala;
2. ***Material Manager***, un database di superfici in cui è possibile modificare i valori dell'assorbimento alle varie frequenze. Sono presenti due valori per il coefficiente di assorbimento: quello rappresentato da  $\alpha_{Sabine}$ , che è il valore ottenuto in camera riverberante con tempo di riverberazione valutato dalla formula di Sabine (form. 2.3), e  $\alpha_{Ramsete}$ , che è il valore "vero" del coefficiente di assorbimento che, se messo uguale ad 1, rende nullo il tempo di riverberazione, contrariamente a ciò che accade con  $\alpha_{Sabine}$ ;

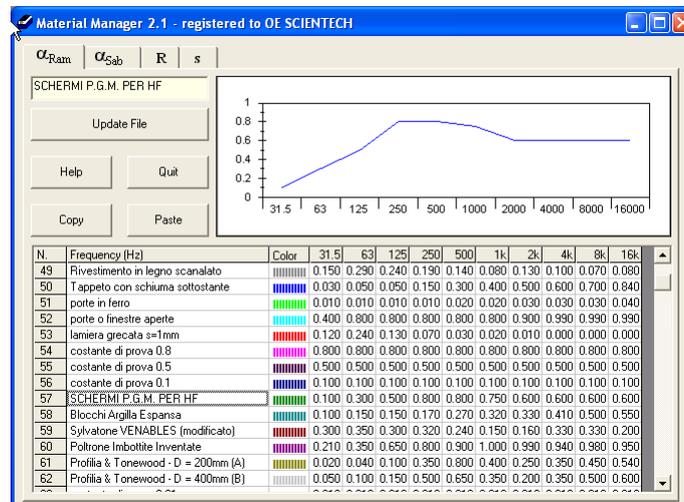


Figura 4.38: Il database Material Manager.

3. **Source Manager**, strumento per la determinazione delle direzionalità della sorgente. Grazie a questo strumento è possibile importare, mediante dati sperimentali, i valori del livello sonoro di una determinata sorgente, che può essere elettro-acustica come un diffusore o meccanica come uno strumento musicale, al variare delle coordinate angolari e della banda di frequenza, e l'interpolazione di eventuali dati mancanti. È possibile inoltre anche la visualizzazione di grafici di direzionalità in 3D (in gergo chiamati *Balloons*).
4. **Ramsete Tracer**, ovvero il “cuore” del programma, il tracciatore. Da esso sono impostabili il livello di suddivisione della sfera, il tempo di volo dei raggi, la risoluzione temporale della risposta all'impulso, la temperatura e il livello di umidità, nonché varie altre caratteristiche. La durata della simulazione dipenderà:
  - dal numero di superfici in maniera pressoché lineare;
  - dal livello di suddivisione in maniera esponenziale;
  - dal tempo di volo in maniera lineare;
  - dalla risoluzione della risposta in maniera lineare.
5. **Ramsete View**, ovvero il programma di elaborazione dei dati, che permette la visualizzazione dei risultati delle simulazioni nonché la mappatura dei parametri.

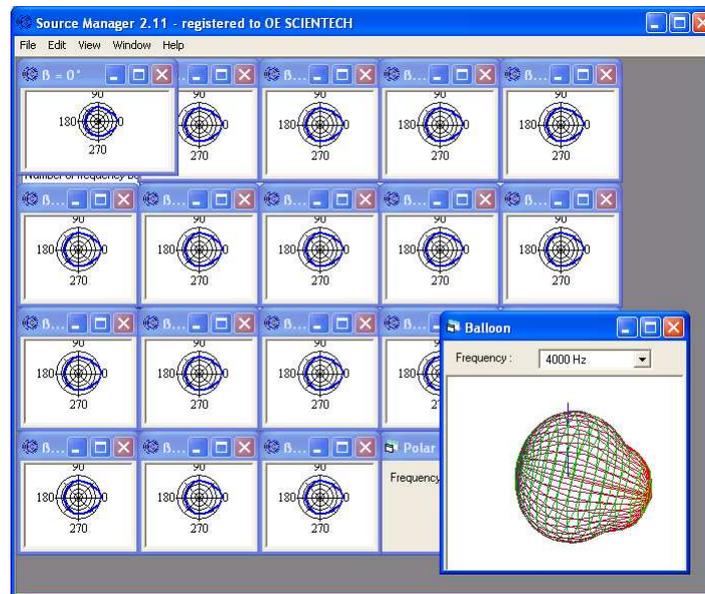


Figura 4.39: Il programma *Source Manager*, con i grafici di direzionalità alle varie frequenze e il rispettivo *Balloon* di direzionalità.

## 4.5 L'auralizzazione

La tecnica dell'auralizzazione ha la funzione di riprodurre la sensazione sonora che si avverte all'interno di una sala da concerto al di fuori di essa mediante l'uso di cuffie e di altoparlanti. Per ottenere questo effetto si ricorre alla convoluzione delle risposte all'impulso ottenute in una sala da concerto con una registrazione musicale effettuata in ambiente anecoico, ovvero comprendente soltanto il suono diretto, eliminando l'effetto acustico della sala di registrazione. Esistono diverse tecniche di riproduzione dei segnali auralizzati; tra di esse ricordiamo:

- riproduzione mediante registrazione di risposte all'impulso stereo ORTF su un semplice impianto stereo; questo tipo di auralizzazione può essere effettuato utilizzando le risposte all'impulso con le varie sorgenti disposte nei punti di emissione degli strumentisti, e poi convolvendole con le parti musicali dello strumento corrispondente. Ovviamente questa procedura è troppo dispendiosa in termini di tempo; per questo si misurano le risposte all'impulso riferite soltanto a poche sorgenti, per esempio al centro, a destra e a sinistra del palcoscenico, e per la musica lirica anche le risposte all'impulso riferite alle posizioni dei cantanti. Con la tecnica della registrazione su piatto rotante è possibile utilizzare una registrazione diversa da quella a  $0^\circ$ , se la sorgente si

trova un pò spostata rispetto alla posizione in cui è stata misurata la risposta all'impulso. Ciò non è del tutto rigoroso, ma si ottengono comunque dei buoni risultati. Per essere perfettamente rigorosi, infatti, si dovrebbe anche considerare la direzionalità degli strumenti alle varie frequenze, oltre alla loro posizione, ma ciò sarebbe oltremodo dispendioso. Alla fine il risultato delle convoluzioni viene sommato e mandato ad alimentare due normali casse stereo;

- riproduzione mediante cuffie di risposte all'impulso binaurali; un segnale anecoico viene convoluto con la risposta all'impulso binaurale riferita al punto di emissione dello strumento considerato. Le risposte all'impulso binaurali possono sempre essere utilizzate per la riproduzione con normali casse stereo: in questo caso però bisognerà applicare un filtro di *cross-talk cancellation* allo scopo di eliminare la funzione di trasferimento della testa, che in questo caso verrebbe applicata due volte a seguito del fatto che la misura è stata effettuata con testa artificiale. Le cuffie hanno però il difetto di creare l'illusione che il suono provenga da dentro la testa; per migliorare la sensazione spaziale possono essere utilizzate tecniche di *head tracking*, che consentono di localizzare l'orientazione della testa nel tempo e di utilizzare delle risposte all'impulso diverse adattandosi al cambiamento di orientazione;
- forme di auralizzazione 3D, in particolare con sistemi *Ambisonics*, *Am-biphonics* e *ITU 5.1 Surround*, in cui le risposte all'impulso dalle varie direzioni possono essere calcolate dalla grande versatilità del microfono *Soundfield*, convolute in tempo reale e mandate alle casse "di competenza". Queste tecniche sono ancora in fase di studio data la complessità dell'argomento.

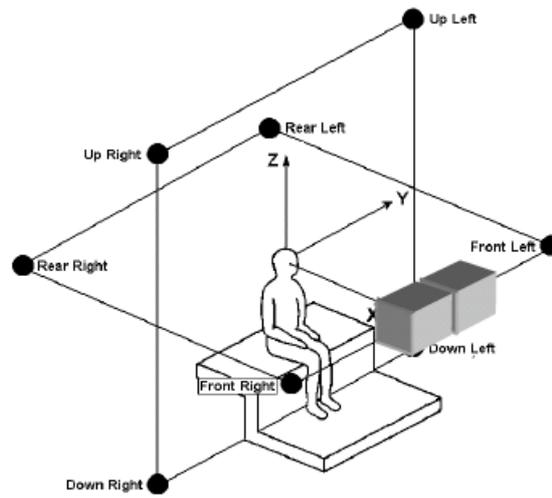


Figura 4.40: Array di diffusori in configurazione tipo Ambiphonics.

# Capitolo 5

## Risultati e confronti

Il presente capitolo, dopo una breve introduzione descrivente la campagna di misurazioni, presenta i risultati ottenuti dalle misurazioni stesse confrontandoli con la simulazione ricavata con *Ramsete*. Esso è diviso in tre parti: nella prima sono esposti i risultati conseguiti con il piatto rotante, e in particolare gli aspetti relativi ai parametri di spazialità al variare dell'angolo di misurazione; nella seconda parte sono presentati i risultati ottenuti con il *DAT*, che ha permesso la registrazione di molteplici risposte binaurali in tutta la sala; infine sono mostrati gli esiti delle simulazioni al calcolatore, confrontandoli con i risultati delle registrazioni in sala.

### 5.1 Le misurazioni

I risultati presentati in questo capitolo si riferiscono alle misurazioni effettuate nella sala S.Cecilia durante la notte tra 20 e 21 giugno 2005 (le misurazioni sono state effettuate di notte allo scopo di ridurre il rumore di fondo). Esse sono state ottenute utilizzando un segnale di *sine sweep* esponenziale tra 22 Hz e 22 KHz di frequenza, generato a 96 KHz di frequenza di campionamento con una dinamica di 32 bit e usato per alimentare il sistema dodecaedro + subwoofer e la cassa direzionale *Genelec*. In Fig. 5.1 sono visibili le posizioni dei diffusori durante le misurazioni: in particolare per il sistema dodecaedro + subwoofer è stata utilizzata la sola posizione centrale (C sulla piantina), mentre il diffusore *Genelec* è stato usato in tutte e tre le posizioni sul palco.

Le registrazioni microfoniche sono state divise in due sessioni:

- nella prima sessione è stato utilizzato il sistema microfoni stereo + microfoni binaurali + microfono *Soundfield*, in configurazione già descritta nel paragrafo 4.3.2, nelle tre posizioni riportate in Fig. 5.2 e utilizzando

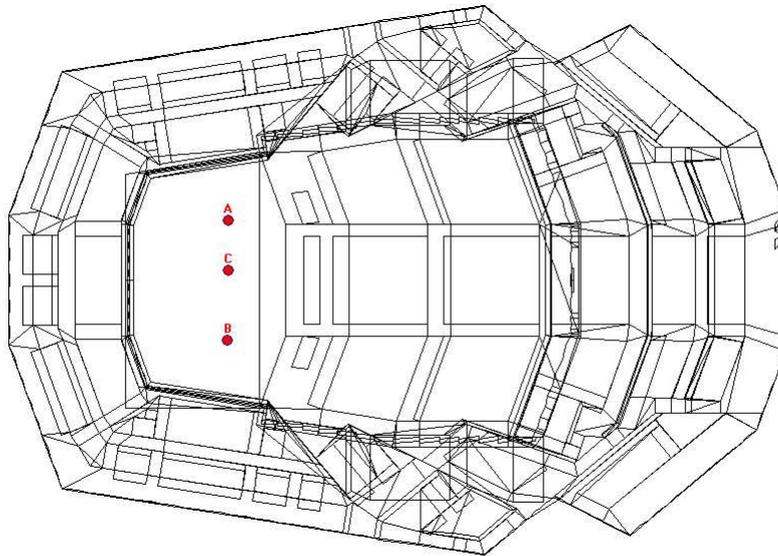


Figura 5.1: Pianta della sala con in evidenza le posizioni dei diffusori utilizzati sul palco.

come diffusori il sistema dodecaedro + subwoofer (soltanto in posizione centrale) e in seguito la cassa *Genelec* (in tutte e tre le posizioni sul palco); questo metodo di misura è molto preciso e raffinato, a causa della qualità dei microfoni e la quantità di informazioni accumulate, e permette uno studio approfondito dei parametri spaziali nei punti in esame. Purtroppo esso è molto lento, quindi sono state prese in esame soltanto tre posizioni;

- nella seconda sessione si è lasciato fisso il sistema subwoofer + dodecaedro in posizione centrale, e si sono misurate le risposte in 28 punti della sala tramite il registratore binaurale *DAT Sony* (cfr. Fig. 5.4). È un metodo molto veloce e quindi permette di conoscere i valori dei parametri in molti punti della sala, a scapito della qualità delle misurazioni.

Per tutti i risultati le bande di frequenze in cui le misurazioni sono più precise sono quelle centrali, quindi tra i 125 Hz e i 4 KHz; le frequenze estreme danno risultati meno affidabili e sono evidenziate con delle fasce colorate (31.5 Hz - 63 Hz e 8 KHz - 16 KHz).

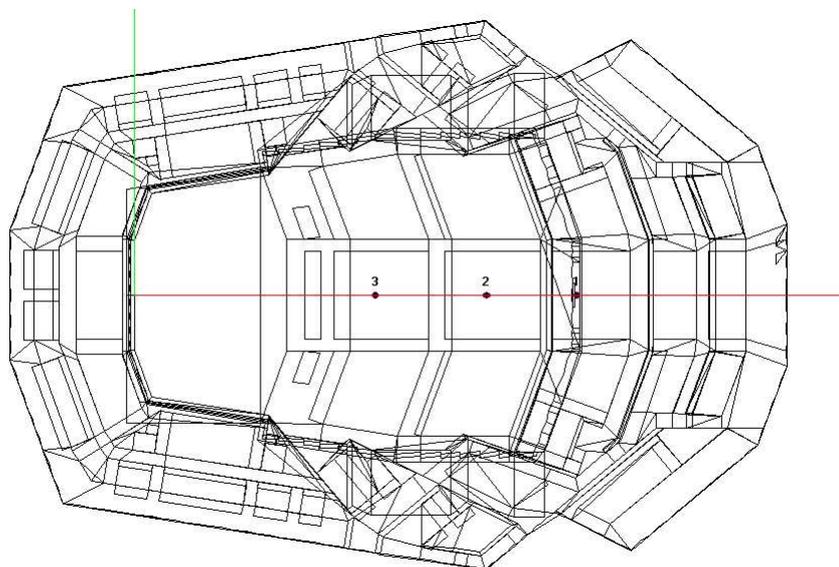


Figura 5.2: Posizioni di rilevazione utilizzando il braccio rotante: i punti 2 e 3 sono in platea, il punto 1 è sulla prima balconata centrale.



Figura 5.3: L'interno della sala con il piatto rotante nella posizione 3 della pianta precedente.

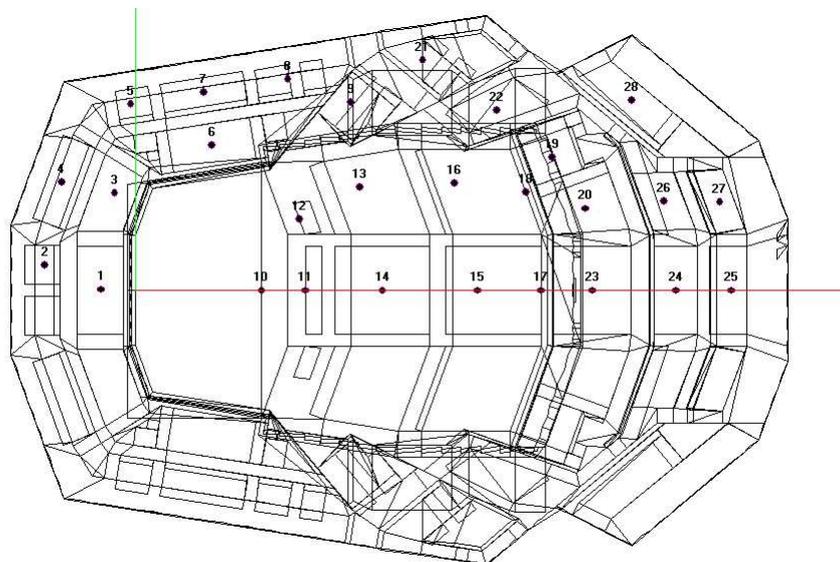


Figura 5.4: Posizioni di rilevazione utilizzando i microfoni DAT.

## 5.2 Risultati delle misurazioni con piatto rotante

### 5.2.1 Tempi di riverberazione

Sono qui presentati i tempi di riverberazione  $T_{20}$  e  $T_{30}$  riferiti al canale W del microfono *Soundfield* rivolto verso il palco nelle tre posizioni di rilevamento e in banda d'ottava tra i 31.5 Hz e i 16 KHz. Si nota come le curve sono praticamente sovrapposte, e quindi la risposta della sala è molto simile nei tre punti in esame. Alle medie frequenze (quelle di particolare interesse musicale) i tempi di riverberazione si mantengono tra 2.2 e 2.6 secondi, che rendono la sala S.Cecilia una sala adatta alla musica sinfonica. Il tempo EDT presenta invece un comportamento più variabile; si nota inoltre che i suoi valori sono in genere più bassi rispetto agli altri tempi di riverberazione. Considerando che in un decadimento perfettamente esponenziale i tempi di riverberazione si equivalgono tra loro, indipendentemente dalla scelta dell'intervallo, è evidente che negli integrali di Schroeder delle risposte all'impulso vi siano cambiamenti di pendenza; dato che in questo caso i valori dell'EDT sono più brevi rispetto agli altri tempi di riverberazione, ciò vuol dire che la risposta all'impulso avrà intensità maggiore nella prima parte del suo decadimento, aumentando la chiarezza.

I valori misurati usando come diffusore la cassa *Genelec* confermano quanto

detto in precedenza: le Fig. 5.8 e 5.9 rappresentano la media delle misurazioni sulle tre posizioni della sorgente (con la relativa deviazione standard), e mostrano come l'andamento dei due tempi di riverberazione sia molto più uniforme (ed anche mediamente più elevato in valore) rispetto a quello dell'EDT, graficato in Fig. 5.10.

### Dodecaedro centrale - T20

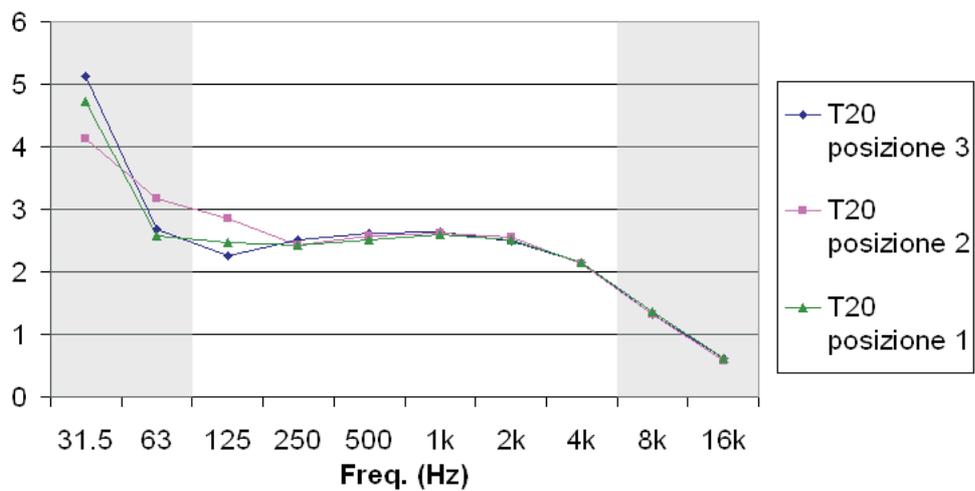


Figura 5.5: Tempo di riverberazione  $T_{20}$  (decadimento di 60 dB interpolato tra -5 dB e -25 dB rispetto al suono diretto) in funzione della frequenza (in bande d'ottava). Il parametro è riferito alla risposta ottenuta dal canale W del microfono *Suondfield* ed è fatta con il microfono diretto verso il palco. Le bande colorate in grigio corrispondono alle frequenze in cui la precisione della catena diffusori-microfoni è sensibilmente minore rispetto alle medie frequenze.

### Dodecaedro centrale - T30

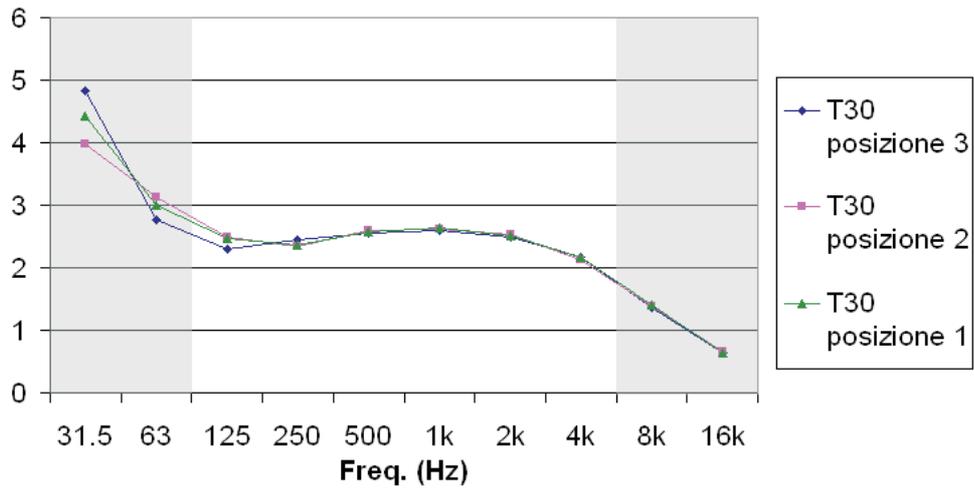


Figura 5.6: Tempo di riverberazione  $T_{30}$  (decadimento di 60 dB interpolato tra -5 dB e -35 dB) in funzione della frequenza.

### Dodecaedro centrale - EDT

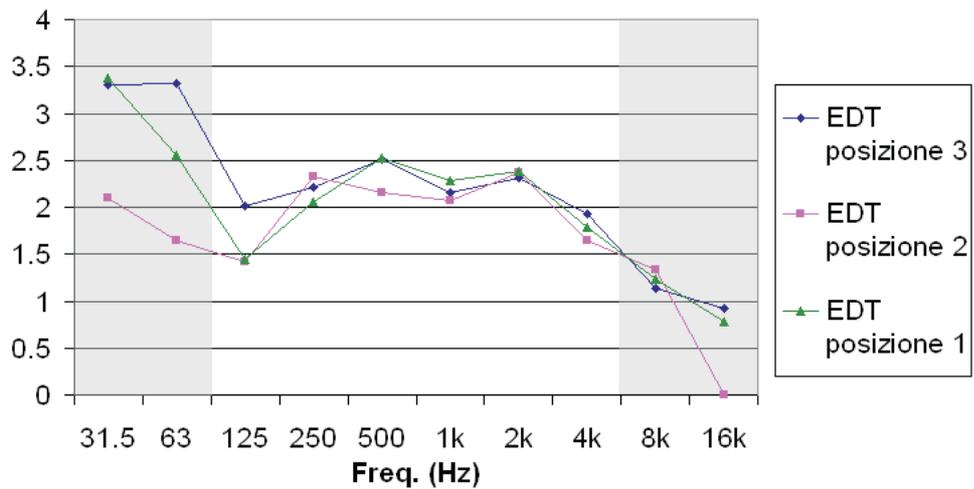


Figura 5.7: EDT (decadimento di 60 dB interpolato tra 0 dB e -10 dB) in funzione della frequenza.

**Genelec - Media di  $T_{20}$  sulle posizioni del diffusore**

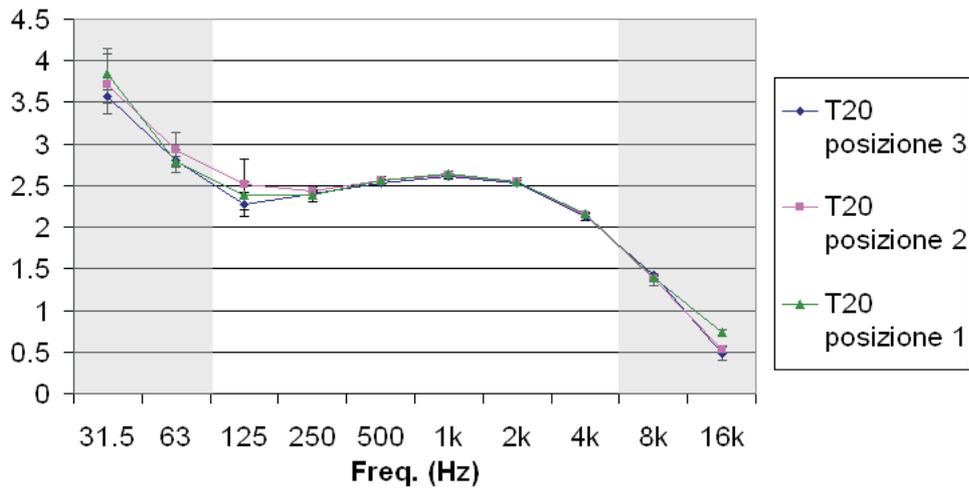


Figura 5.8: Media del  $T_{20}$  sulle tre posizioni del diffusore *Genelec* con relativa deviazione standard.

**Genelec - Media di  $T_{30}$  sulle posizioni del diffusore**

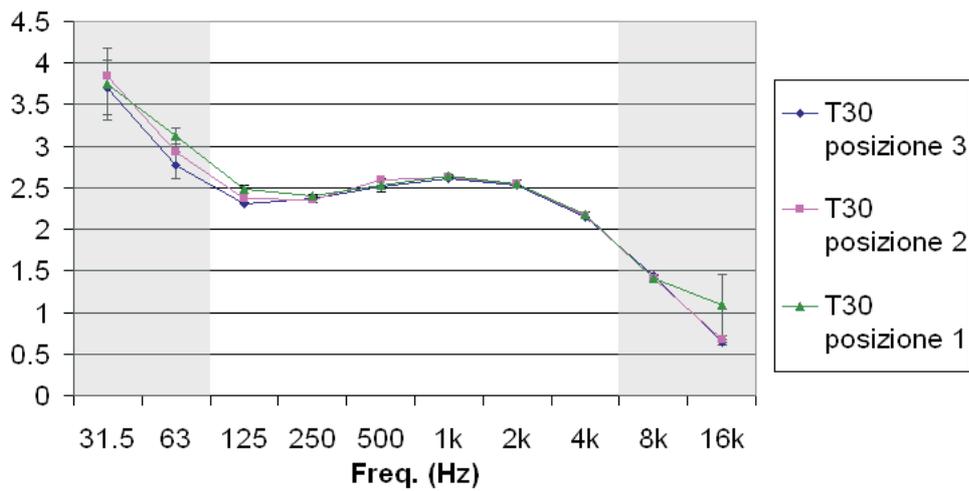


Figura 5.9: Media del  $T_{30}$  sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

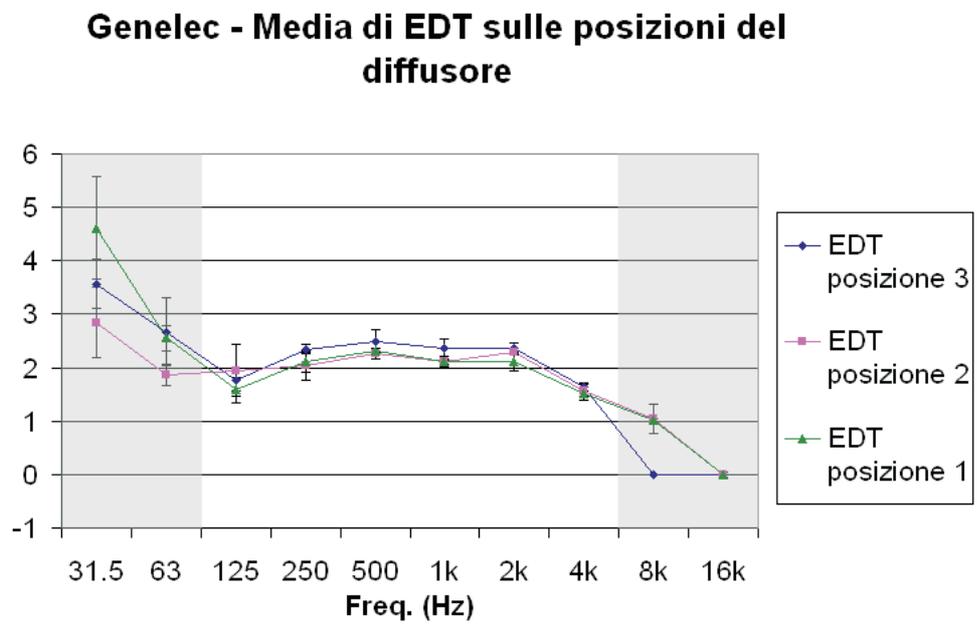


Figura 5.10: Media di EDT sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

### 5.2.2 Parametri di chiarezza e tempo baricentrico

I grafici seguenti rappresentano gli andamenti dei parametri relativi alla chiarezza della risposta all'impulso, e nella fattispecie  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  e  $T_s$ ; si è scelto di graficare  $C_{50}$  al posto di  $D_{50}$  in quanto, pur contenendo la stessa informazione, il primo parametro ha espressione simile a  $C_{80}$ .

Comparando i grafici di  $C_{50}$  e  $C_{80}$  si deduce una buona distribuzione dell'intensità della coda sonora nel tempo, in quanto le due curve si comportano in modo simile in funzione della frequenza (ovviamente con il grafico di  $C_{80}$  traslato di alcuni dB più in alto rispetto a quello di  $C_{50}$ ). Dai grafici inoltre si deduce che il punto con l'andamento più uniforme è il punto 2, che risulta anche quello con maggiore chiarezza con la sorgente omnidirezionale. Il tempo baricentrico  $T_s$  mostra lo stesso andamento degli altri due parametri, compresa la maggiore chiarezza nelle frequenze centrali del punto 2 rispetto al punto 3 con sorgente omnidirezionale.

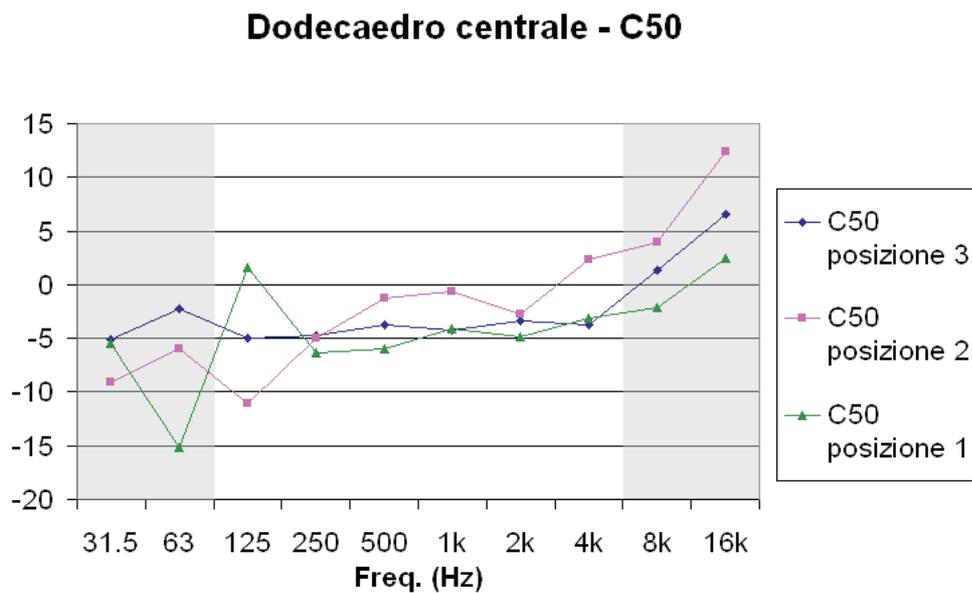


Figura 5.11: Grafico del parametro  $C_{50}$  in funzione della frequenza.

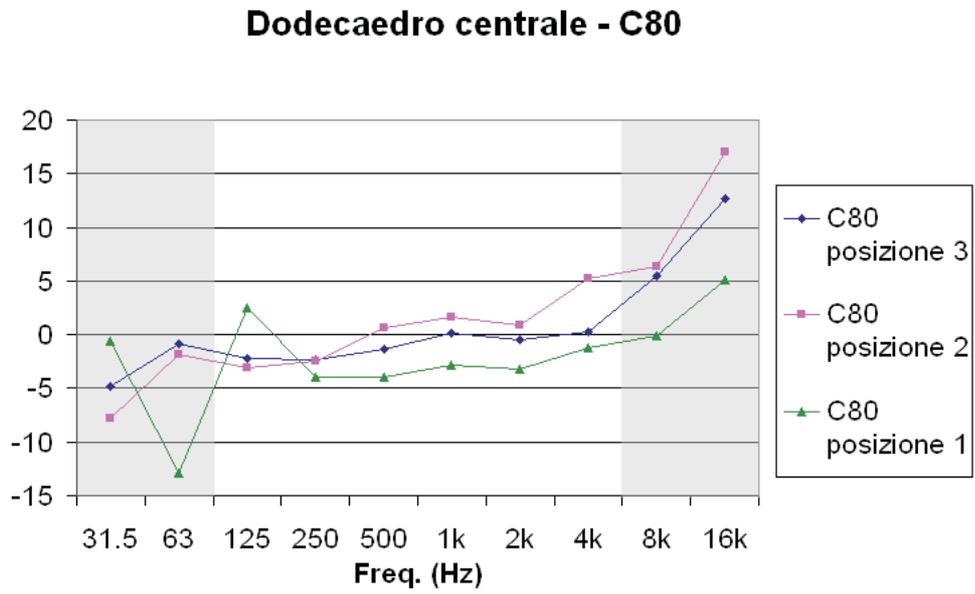


Figura 5.12: Grafico del parametro  $C_{80}$  in funzione della frequenza.

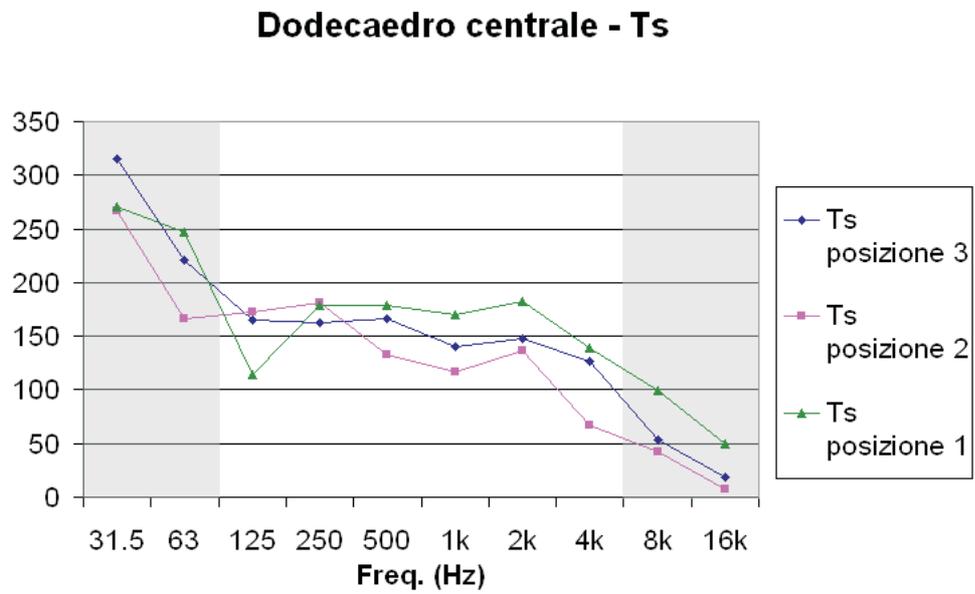


Figura 5.13: Grafico del parametro  $T_s$  in funzione della frequenza.

**Genelec - Media di C<sub>50</sub> sulle posizioni del diffusore**

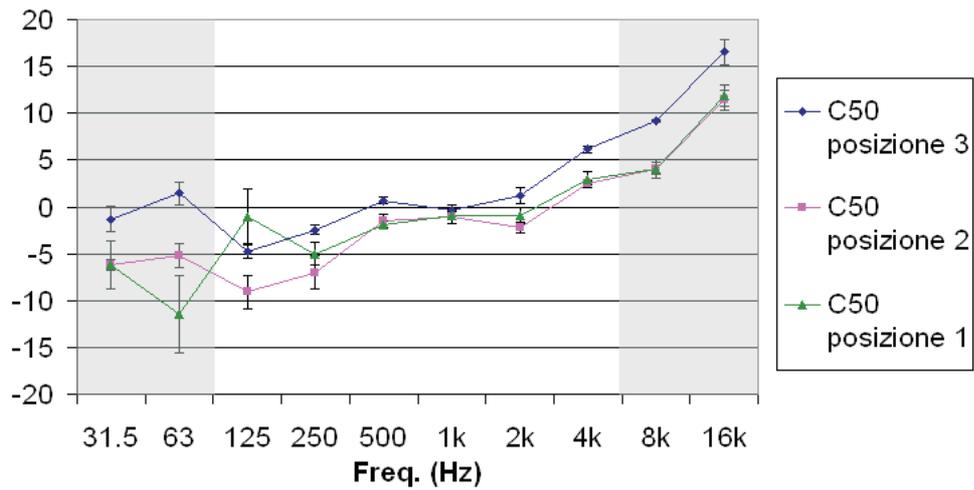


Figura 5.14: Media di  $C_{50}$  sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

**Genelec - Media di C<sub>80</sub> sulle posizioni del diffusore**

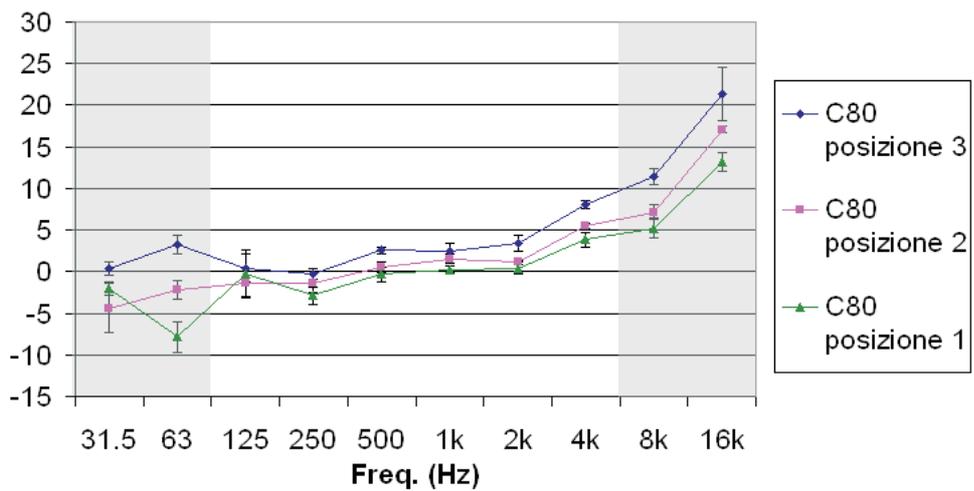


Figura 5.15: Media di  $C_{80}$  sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

### Genelec - Media di $T_s$ sulle posizioni del diffusore

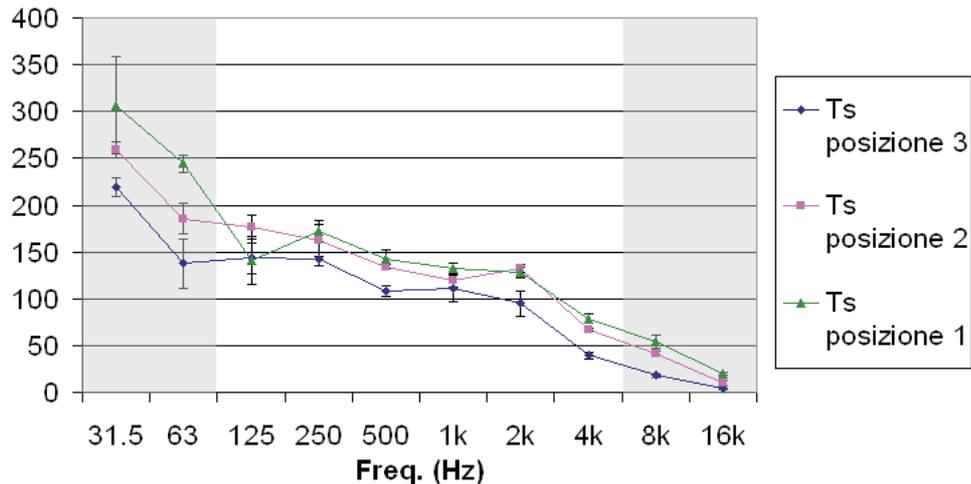


Figura 5.16: Media di  $T_s$  sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

### 5.2.3 Parametro G

Nelle figure 5.17 e 5.18 sono presentati i valori del parametro  $G$  in funzione della frequenza rispettivamente con la sorgente omnidirezionale in posizione centrale e mediando i risultati ottenuti con il diffusore *Genelec* nei tre punti del palco. I valori ottenuti non corrispondono alla definizione data nel paragrafo 2.5 del parametro  $G$ , in quanto non è stato possibile tarare i sistemi diffusore-microfoni, soprattutto a causa del fatto che si sono usati diffusori e microfoni differenti; tuttavia sono esatte le distanze in dB tra le curve nei vari punti di misura (l'effetto della taratura corrisponde semplicemente ad una variazione del fondo scala), ed è quindi possibile ricavare informazioni sulle differenze di intensità acustica.

Dai grafici si nota che la sala rinforza in particolare le frequenze medio-alte (tra 1 KHz e 8 KHz, ed in particolare le bande di 2 KHz e 4 KHz). Inoltre le differenze del parametro tra i vari punti della sala sono rilevanti (più di 5 dB) utilizzando la sorgente omnidirezionale (in cui peraltro risulta che la posizione 2, più distante, ha un rinforzo maggiore rispetto al punto 3), mentre sono più smussate con il diffusore *Genelec*.

**Dodecaedro centrale - G**

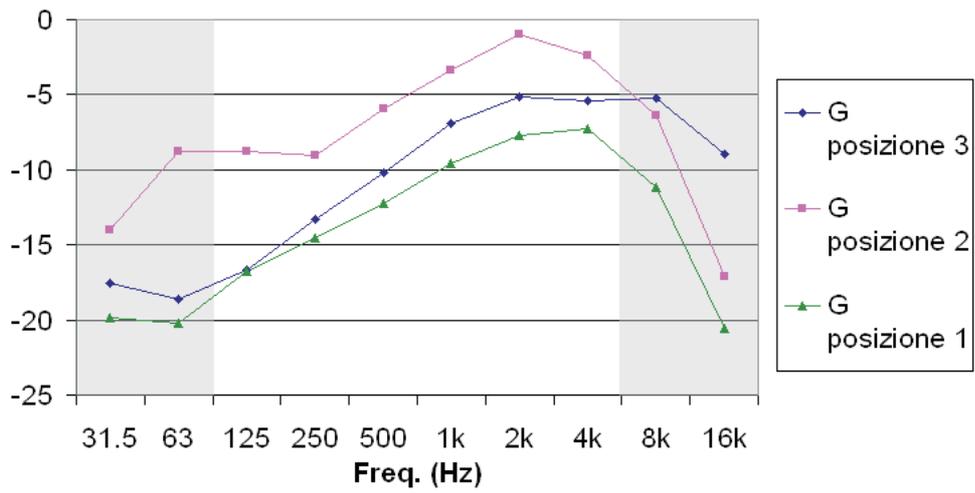


Figura 5.17: Grafico del parametro G in funzione della frequenza.

**Genelec - Media di G sulle posizioni del diffusore**

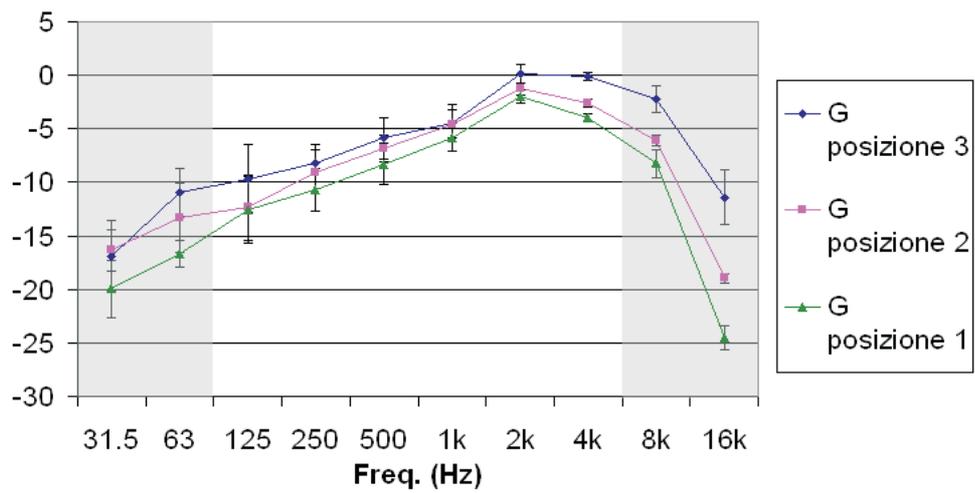


Figura 5.18: Media di G sulle posizioni del diffusore *Genelec*.

### 5.2.4 Parametri di spazialità

I grafici presentati in questo paragrafo mostrano l'andamento dei parametri LF e IACC al variare dell'angolo di misura come descritto nel paragrafo 4.3.2. L'utilizzo di questi diagrammi polari è una novità e ancora si deve comprendere quali informazioni possano essere estratte da essi [28]; in questa tesi si è cercato di dare delle interpretazioni ai risultati ottenuti. Tra i parametri ottenibili con il microfono *Soundfield* si è scelto di utilizzare soltanto LF, e non LE o LFC, in quanto è il parametro che presenta la variabilità maggiore nel diagramma polare [28].

Le figure 5.19, 5.20 e 5.21 mostrano i suddetti diagrammi polari con il diffusore *Genelec* al centro del palco e il piatto rotante nelle tre posizioni di misurazione, mentre le figure 5.22, 5.23 e 5.24 sono riferite alle stesse posizioni di misurazione, ma con la sorgente posta alla sinistra del palco. I risultati sono mediati in modo da avere 3 curve, riferite alle frequenze basse (63, 125 e 250 Hz), medie (500, 1000 e 2000 Hz) e alte (4, 8 e 16 KHz); il disco nero identifica la posizione angolare della sorgente.

I grafici denotano un andamento piuttosto uniforme del parametro LF, in particolare per le frequenze medio-alte. Le figure 5.19 e 5.22, riferite alla posizione 3, registrano valori del parametro piuttosto bassi alle frequenze medie (che sono anche le più interessanti e indicative); i valori si mantengono bassi sull'intero angolo giro, e ciò denota che il suono proviene in gran parte dall'alto. Le altre posizioni registrano un valore più elevato del parametro, e in particolare il punto 2 mostra un andamento abbastanza uniforme sia in funzione dell'angolo di rilevazione sia in funzione della frequenza. La figura 5.25 mostra il confronto tra i grafici ottenuti utilizzando il dodecaedro e il *Genelec* in posizione centrale nel punto di registrazione numero 3; si nota come i grafici abbiano forma simile, con i valori registrati con il dodecaedro (ovviamente) più grandi rispetto a quelli registrati con il *Genelec*.

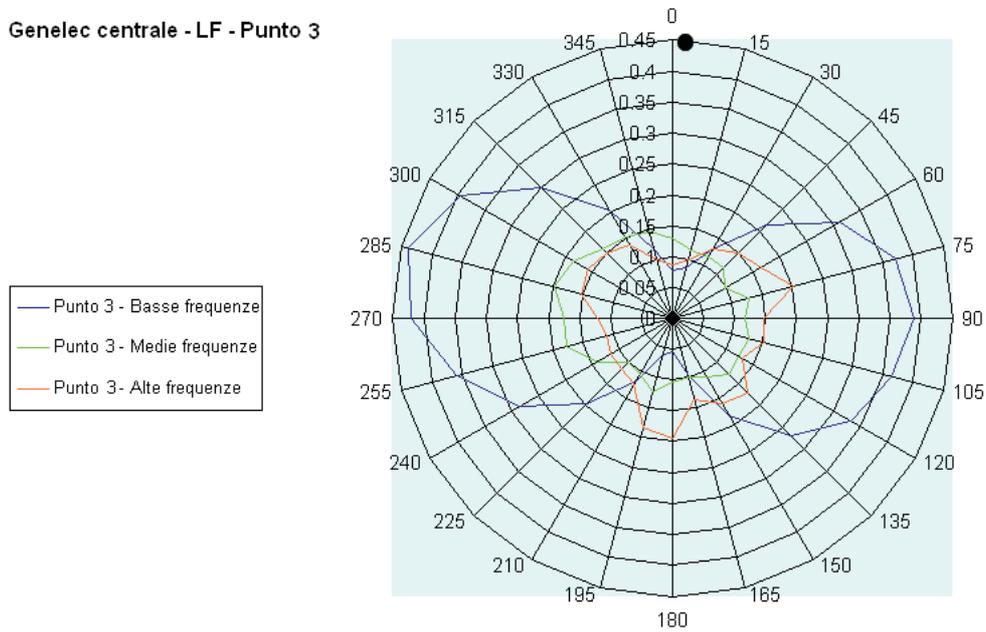


Figura 5.19: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 3; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

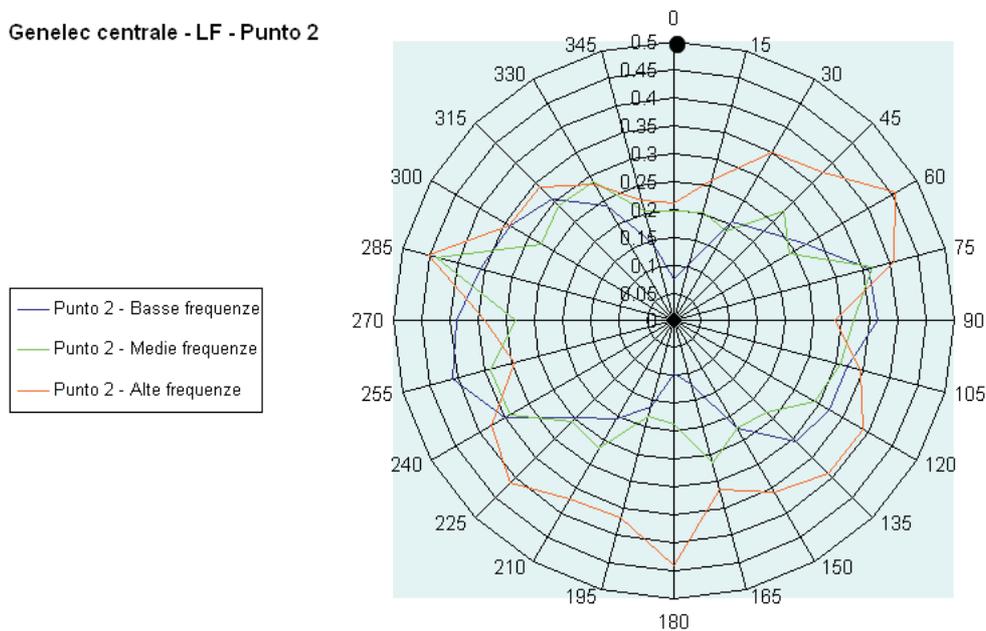


Figura 5.20: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 2.

**Genelec centrale - LF - Punto 1**

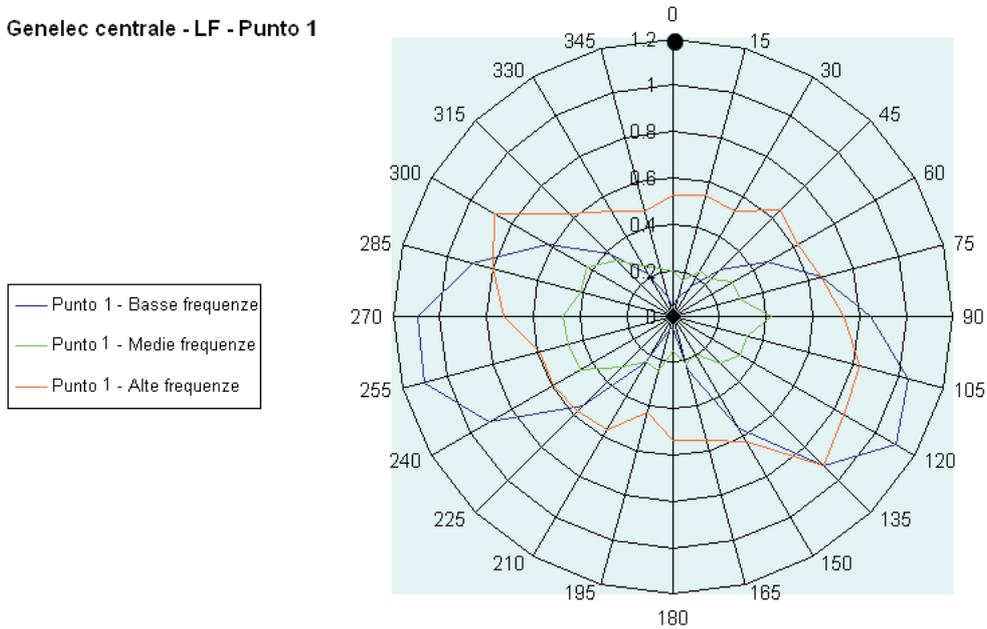


Figura 5.21: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 1.

**Genelec sinistra - LF - Punto 3**

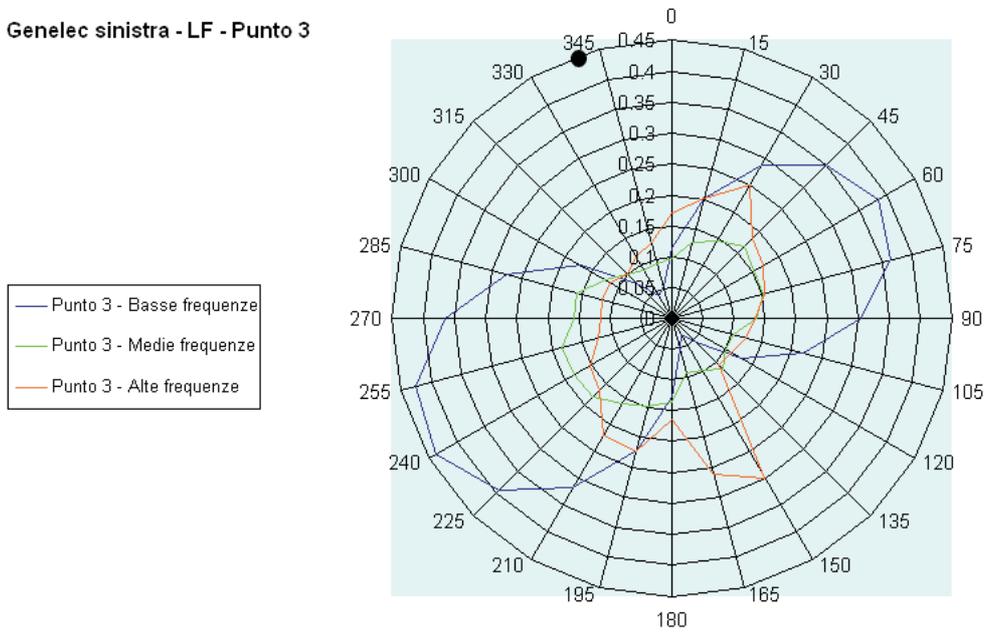


Figura 5.22: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco (punto B fig. 5.1) e piatto rotante in posizione 3.

**Genelec sinistra - LF - Punto 2**

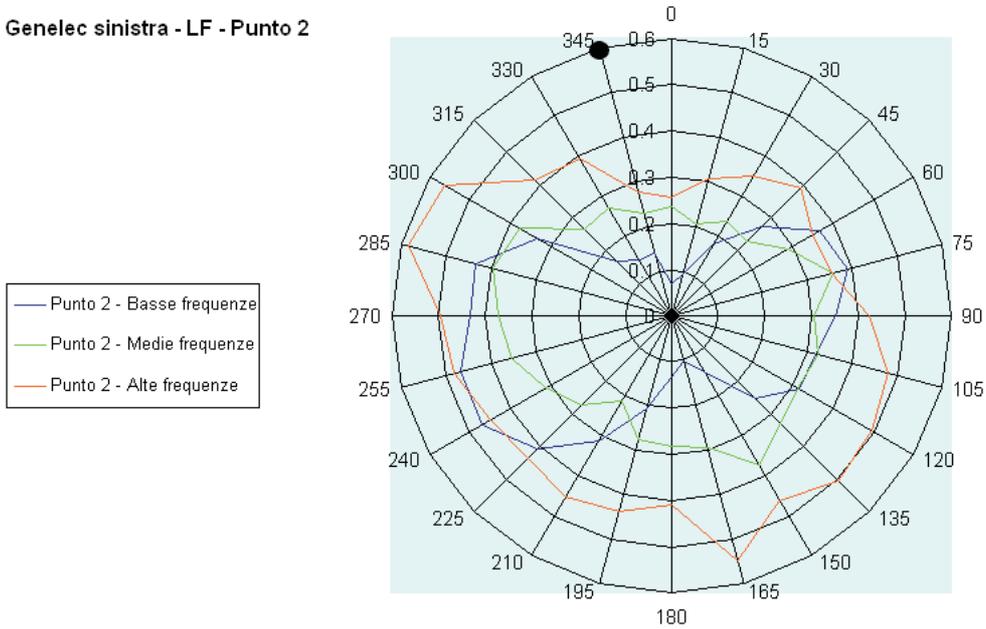


Figura 5.23: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco e piatto rotante in posizione 2.

**Genelec sinistra - LF - Punto 1**

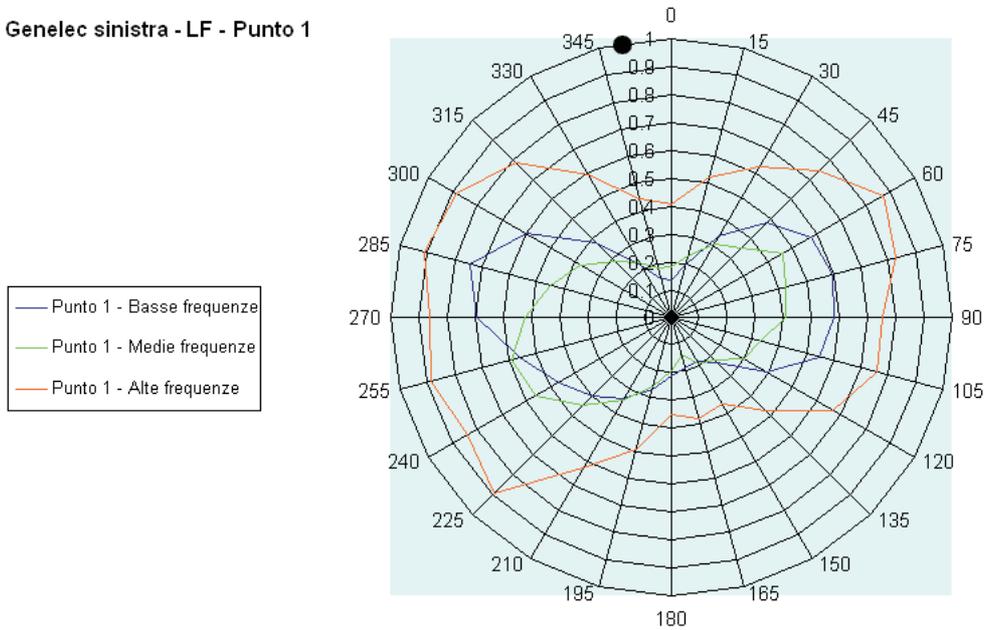


Figura 5.24: Diagramma polare di LF con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco e piatto rotante in posizione 1.

Confronto tra Genelec centrale e dodecaedro centrale - Punto 1

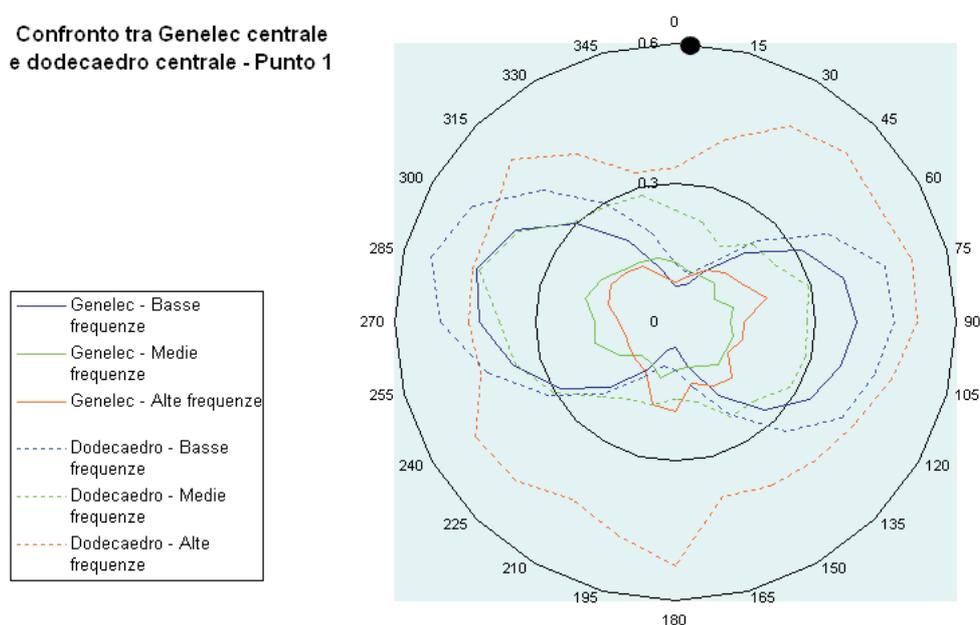


Figura 5.25: Confronto tra grafici ottenuti con dodecaedro e *Genelec* al centro del palco registrati nella posizione 3.

Le figure dalla 5.26 alla 5.31 mostrano i diagrammi polari di IACC alle frequenze centrali (0.5, 1 e 2 KHz) con il diffusore *Genelec* posizionato al centro e sulla sinistra del palco; le misurazioni sono state effettuate nelle consuete 3 posizioni di registrazione. Il parametro illustrato è  $IACC_A$  (quindi con limiti di integrazione di 0 e  $\infty$ ), in quanto il valore di  $IACC_L$  (tra 80 ms ed  $\infty$ ) è sempre molto piccolo e quasi indipendente dall'angolo di misurazione.

I grafici mostrano un andamento singolare in funzione della frequenza: infatti mentre a 500 Hz il parametro è abbastanza uniforme (seppur maggiore nelle direzioni a  $90^\circ$  rispetto alla sorgente), a 1 KHz e soprattutto a 2 KHz il grafico mostra diversi picchi e ventri, che indicano un campo sonoro polarizzato. Le differenze con l'andamento del parametro LF non possono essere spiegate con il solo fatto che la testa rotante rimane sostanzialmente ferma, mentre il microfono *Soundfield* descrive un cerchio di raggio pari alla lunghezza dell'asta che lo sorregge; un elemento che probabilmente contribuisce alla differenza tra i due parametri è il taglio dell'onda diretta nel calcolo di LF.

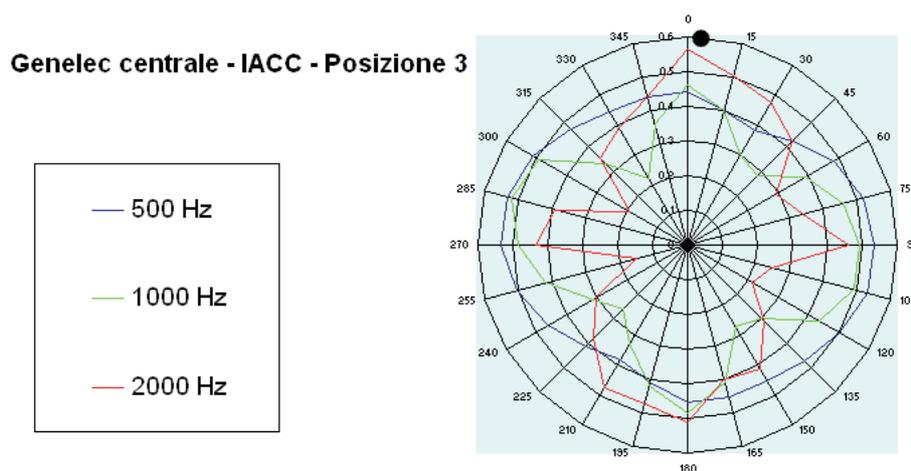


Figura 5.26: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHz) con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 3; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

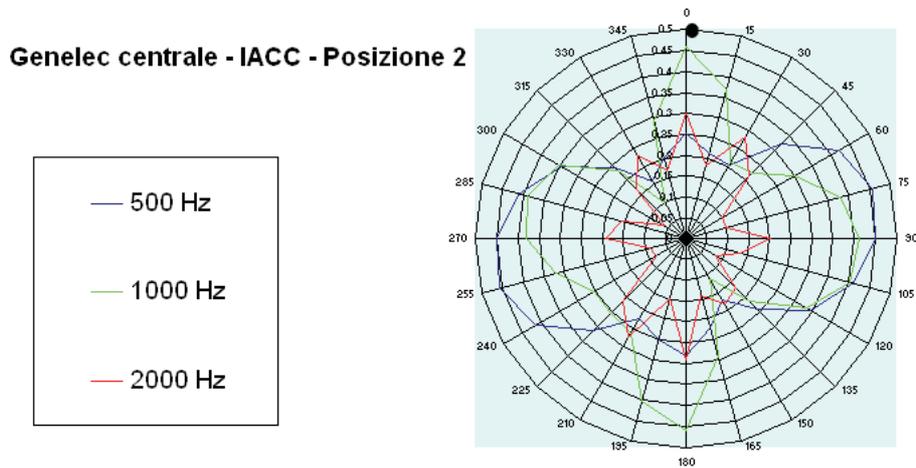


Figura 5.27: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHz) con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 2; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

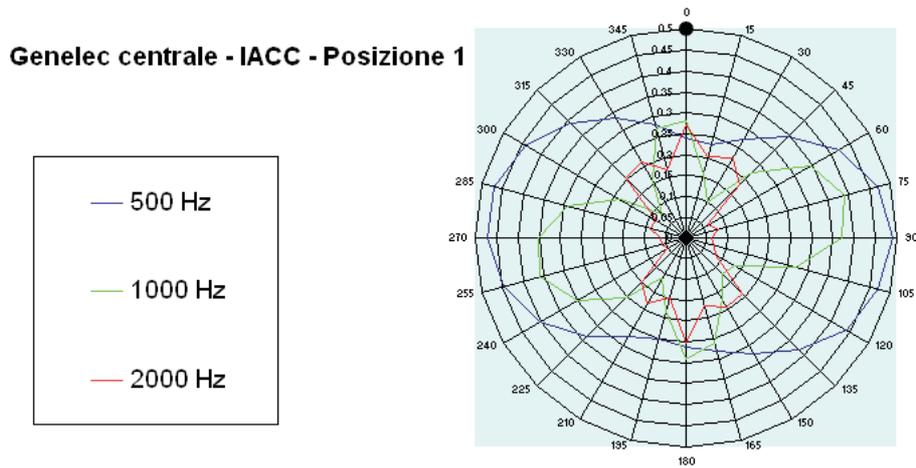


Figura 5.28: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHz) con diffusore *Genelec* al centro del palco e piatto rotante in posizione 1; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

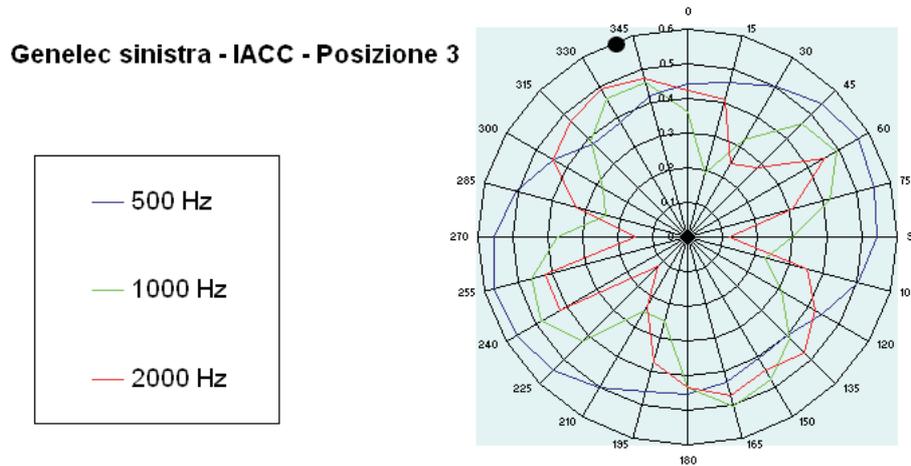


Figura 5.29: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHz) con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco e piatto rotante in posizione 3; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

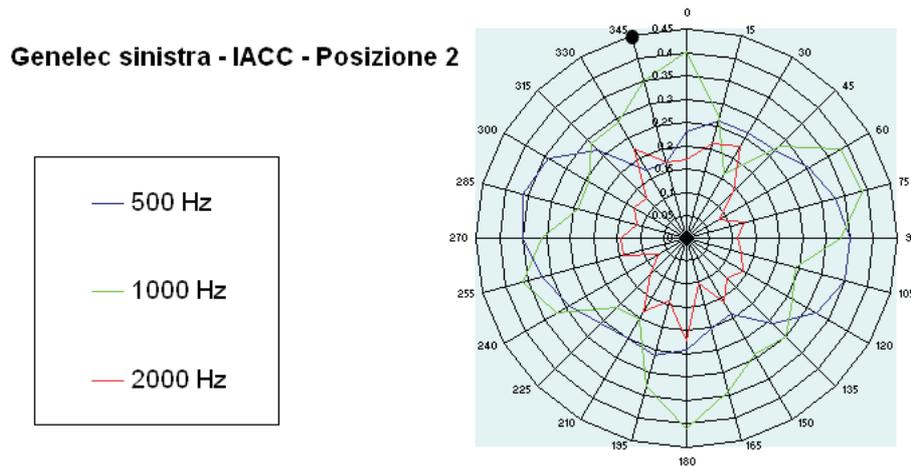


Figura 5.30: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHz) con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco e piatto rotante in posizione 2; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

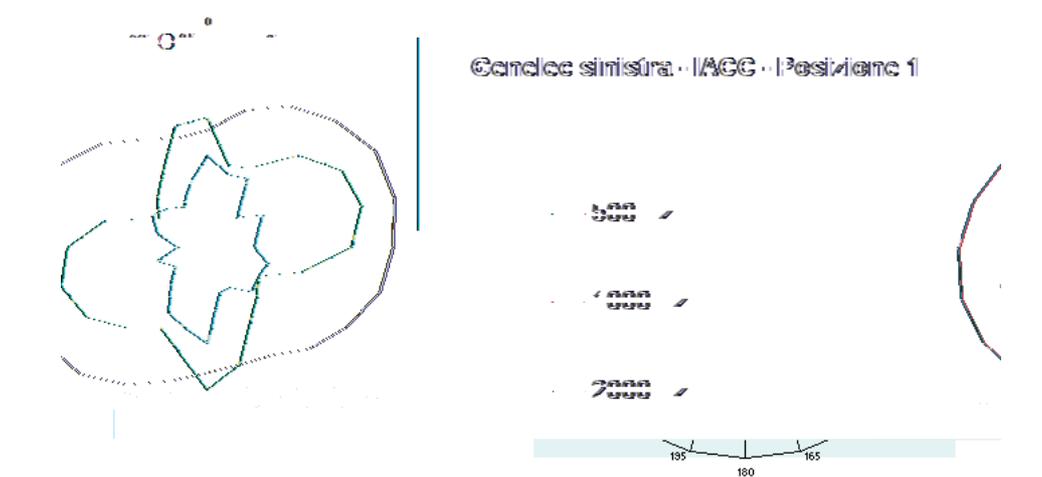


Figura 5.31: Diagramma polare di  $IACC_A$  alle frequenze centrali (500 Hz, 1 KHz e 2 KHZ) con diffusore *Genelec* sulla sinistra del palco e piatto rotante in posizione 1; il disco nero si riferisce alla posizione angolare della sorgente.

### 5.3 Risultati delle misurazioni col registratore *DAT*

Le misurazioni col registratore *DAT Sony* consentono una descrizione spaziale abbastanza dettagliata dei parametri acustici all'interno del teatro. Vengono qui presentati i risultati medi ottenuti in funzione della frequenza, nonché la mappa di distribuzione dei parametri (misurati sia con il *DAT* sia con le misure binaurali del piatto rotante) alla frequenza caratteristica di 500 Hz; la mappa, disegnata con il programma *Ramsete View*, è stata ottenuta con l'algoritmo di interpolazione di minima curvatura; per la simmetria della sala le registrazioni sono state effettuate soltanto in metà sala.

Per alcuni parametri, data la grande variabilità degli stessi all'interno della sala, è stato ritenuto opportuno studiarne l'andamento in frequenza dividendo la sala in settori. La suddetta divisione è presentata in figura 5.32, in cui è possibile notare che:

- i settori 1 e 2 formano la platea;
- i settori 3, 4 e 5 comprendono rispettivamente le balconate dietro al palco, ai lati del palco e al di sopra della platea;
- i settori 6 e 7 formano le balconate centrali dietro la platea.

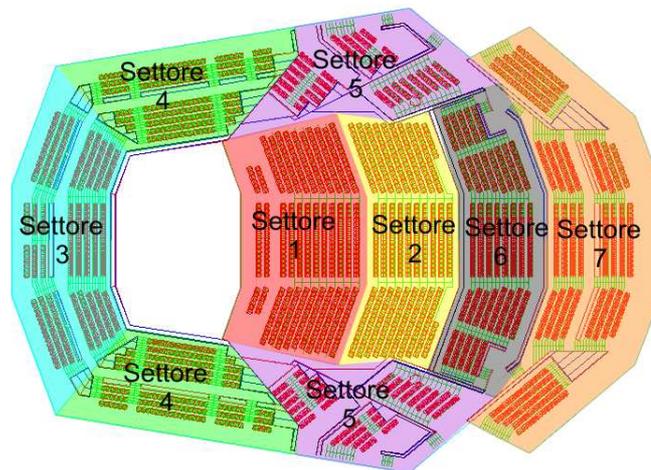


Figura 5.32: Divisione in settori della pianta della sala.

### 5.3.1 Tempi di riverberazione

In fig. 5.33 è mostrato il grafico del tempo di riverberazione  $T_{20}$  medio in funzione della frequenza: l'andamento della curva è simile a quello ottenuto dalle misure con piatto rotante. Dal grafico si nota inoltre che alle medie frequenze (quelle di maggior interesse acustico) la deviazione standard è molto piccola, e quindi il parametro è molto omogeneo all'interno della sala; questa caratteristica è ben osservabile nella mappa (fig.5.36), che mostra la distribuzione del parametro. La media di  $T_{20}$  a 500 Hz è 2.57 s con una deviazione standard  $\sigma = 0.06$  s; questo valore è ottimo se si considera che la minima differenza percettibile del parametro è del 5% [3], pari a circa 0.12 s.

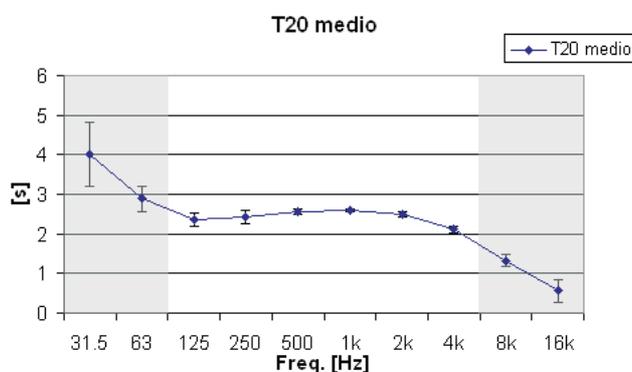


Figura 5.33: Media di  $T_{20}$  sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante (posizioni 29, 30 e 31). Le misure sono binaurali; le bande in grigio si riferiscono alle frequenze con minore sensibilità della catena diffusore-microfoni.

Nelle figure 5.34 e 5.37 sono mostrati il grafico medio in funzione della frequenza e la mappa di distribuzione del  $T_{30}$ ; anche in questo caso si nota una buona distribuzione del parametro nella sala. La media di  $T_{30}$  a 500 Hz è 2.57 s con una deviazione standard  $\sigma = 0.04$  s, quindi perfino minore rispetto a  $T_{20}$ . Inoltre il valor medio è identico, e dunque si presume che (in media) le pendenze degli integrali di Shroeder siano costanti durante il decadimento.

Infine sono presentati il grafico medio e la mappa di distribuzione di EDT; in questo caso, contrariamente ai casi precedenti, le differenze tra le varie posizioni di misura sono abbastanza rilevanti. Ad esempio a 500 Hz (valor medio 2.42 s) si riscontra una deviazione standard di ben 0.5 s, e dunque ben al di sopra della soglia di minima percettibilità di circa 0.12 s. Dalla mappa si nota che ciò è dovuto anche al fatto che la rilevazione sul palco (nella posizione di direzione d'orchestra) ha dato come risultato 0 (poiché, essendo il punto di rilevazione molto vicino alla sorgente, l'onda

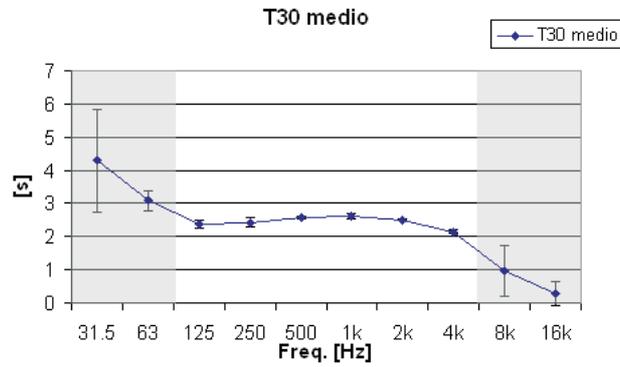


Figura 5.34: Media di  $T_{30}$  sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.

diretta risulta molto intensa). Tuttavia, anche escludendo questo punto, si ottiene una deviazione standard di 0.3 s e valor medio di 2.5 s.

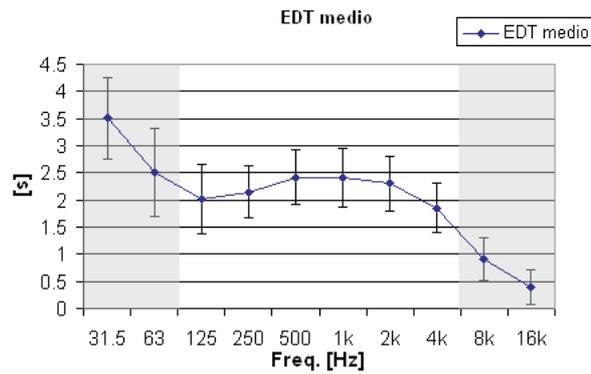


Figura 5.35: Media di EDT sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.





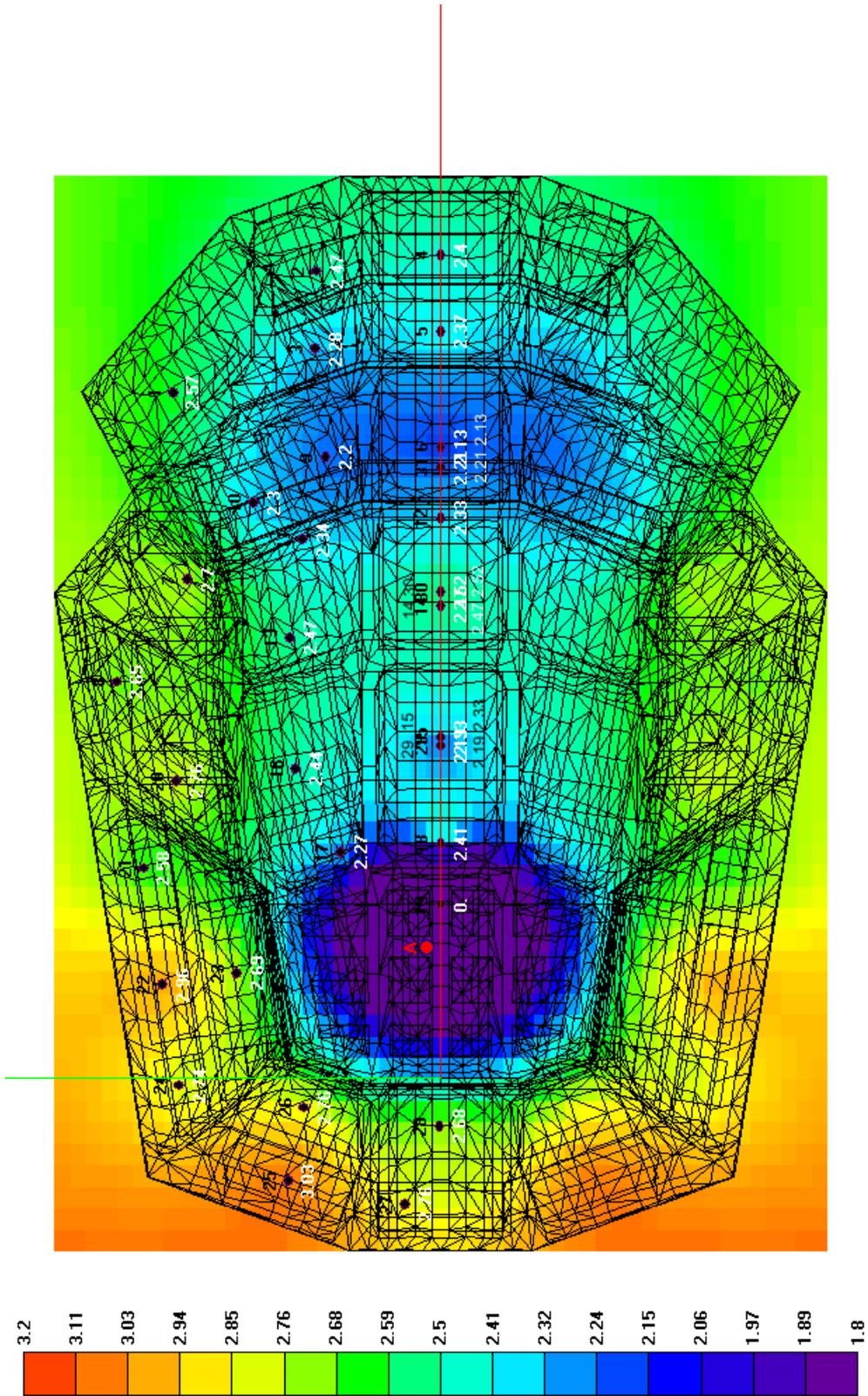


Figura 5.38: Mappa del parametro EDT alla frequenza di 500 Hz.

### 5.3.2 Parametri di chiarezza e tempo baricentrico

Nelle fig. 5.39, 5.40 e 5.41 è mostrato l'andamento in funzione della frequenza dei valori medi rispettivamente di  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  e  $T_s$ ; si può notare come questi valori siano molto poco uniformi all'interno della sala. Nelle fig. 5.42, 5.43 e 5.44 sono presentati invece i grafici dei parametri nei diversi settori della sala; nelle fig. 5.45, 5.46 e 5.47 sono rappresentate le mappe dei parametri a 500 Hz (valori medi  $-3.19 \pm 3.36$  dB,  $-0.73 \pm 2.79$  dB e  $145.6 \pm 33.6$  ms). Osservando il grafico di  $C_{50}$  nei vari settori, risulta che i valori maggiori del parametro si ottengono (ovviamente) nei posti più vicini al palco, in particolare quelli dei settori 3 e 4. Si nota come il settore 2 mostri i valori del parametro più bassi, persino rispetto ai settori più lontani del palco. I bassi valori dei parametri di chiarezza in platea sono dovuti a forti riflessioni oltre gli 80 ms: ad esempio in fig. 5.48 è possibile vedere la prima parte della risposta all'impulso binaurale del punto 30 (misurata con la testa artificiale e i microfoni migliori di quelli del *DAT*). È ben evidente una forte riflessione a circa 120 ms.

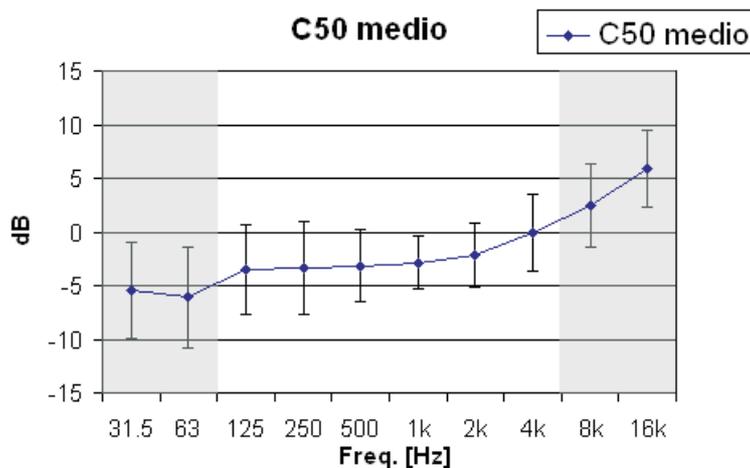


Figura 5.39: Media di  $C_{50}$  sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.

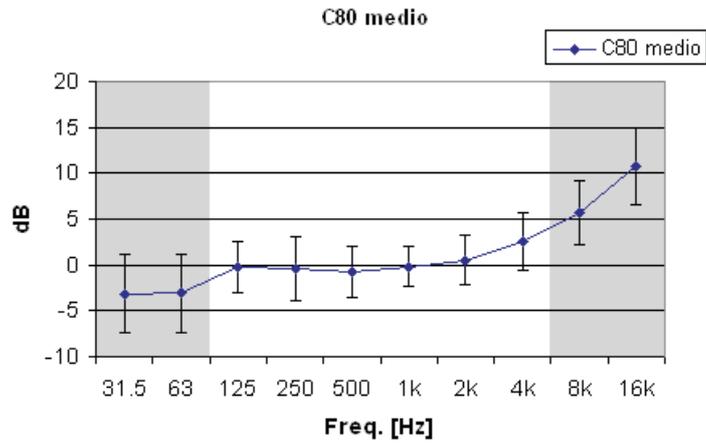


Figura 5.40: Media di  $C_{80}$  sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.

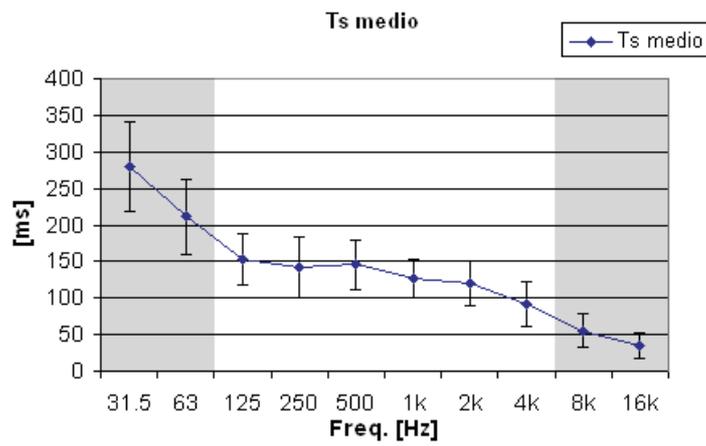


Figura 5.41: Media di  $T_s$  sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.

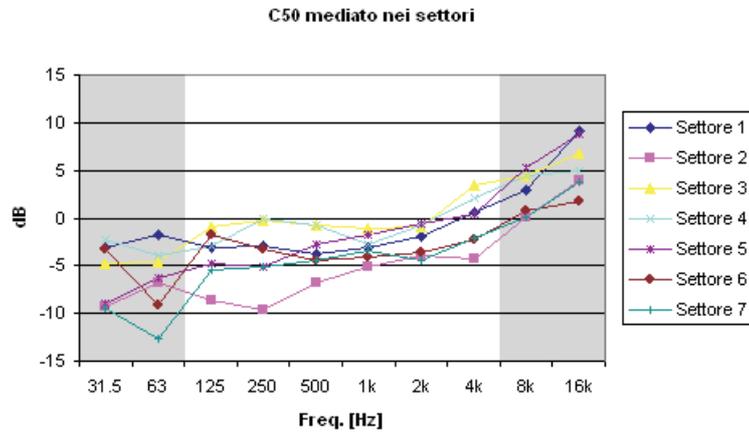


Figura 5.42: Media di  $C_{50}$  nei diversi settori della sala.

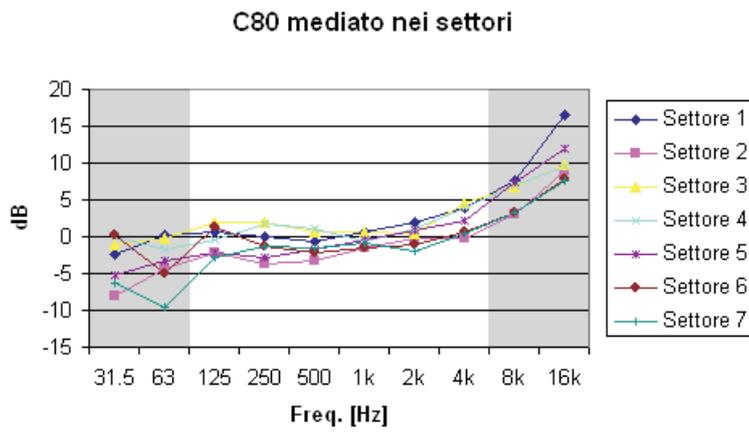


Figura 5.43: Media di  $C_{50}$  nei diversi settori della sala.

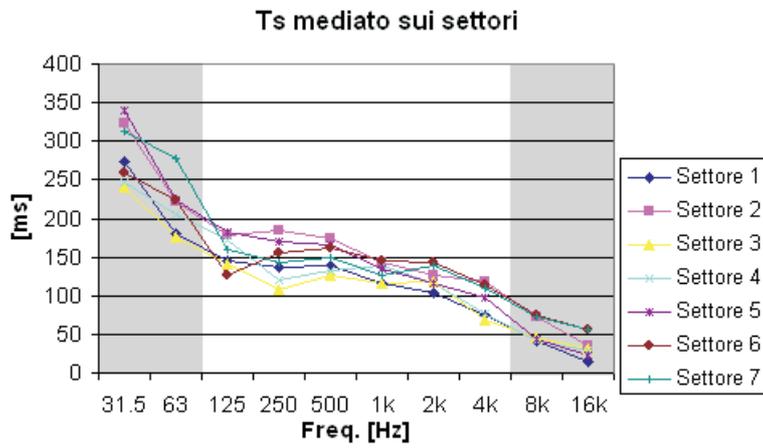


Figura 5.44: Media di  $T_s$  nei diversi settori della sala.

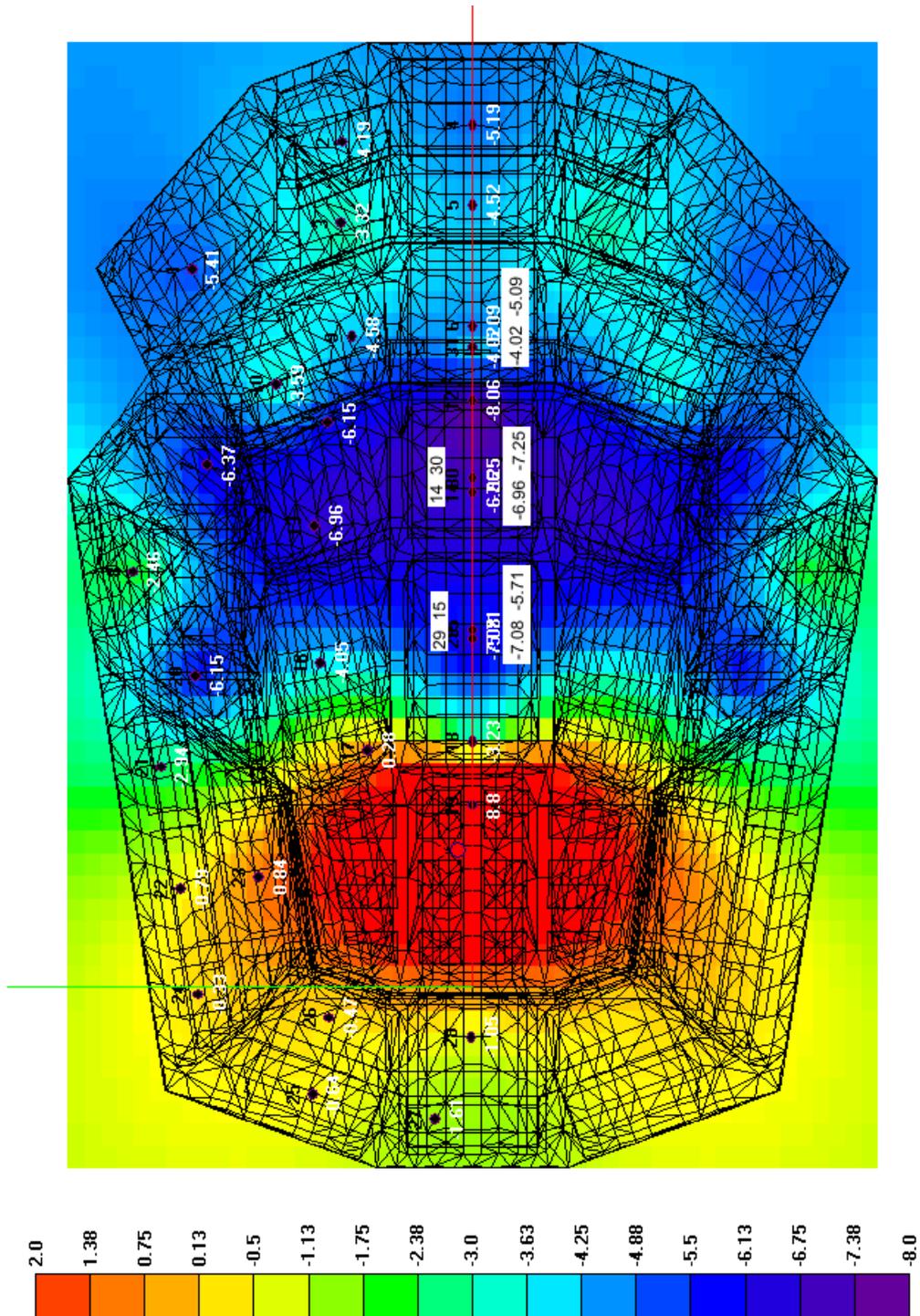


Figura 5.45: Mappa del parametro  $C_{50}$  alla frequenza di 500 Hz.

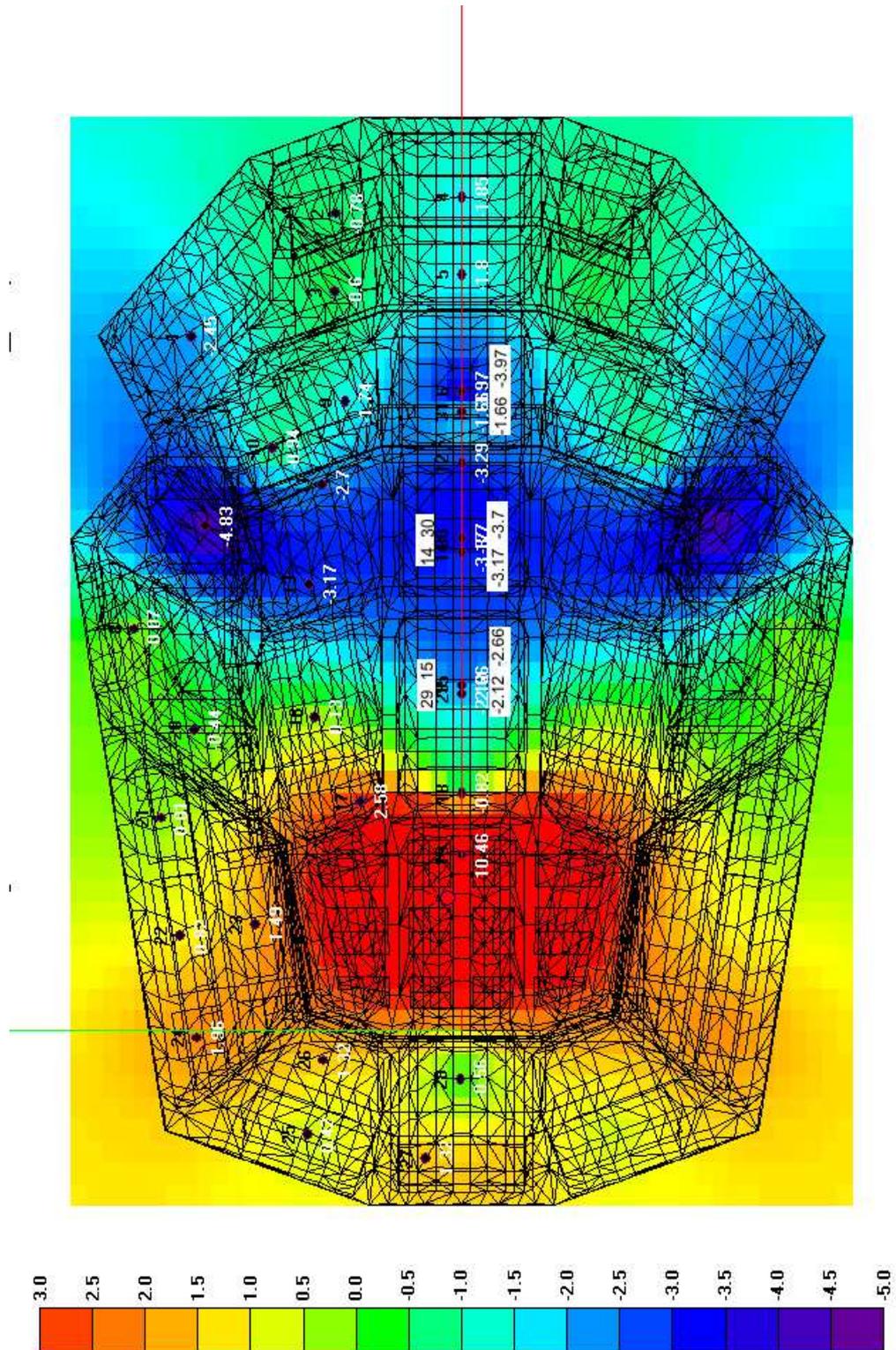


Figura 5.46: Mappa del parametro  $C_{80}$  alla frequenza di 500 Hz.



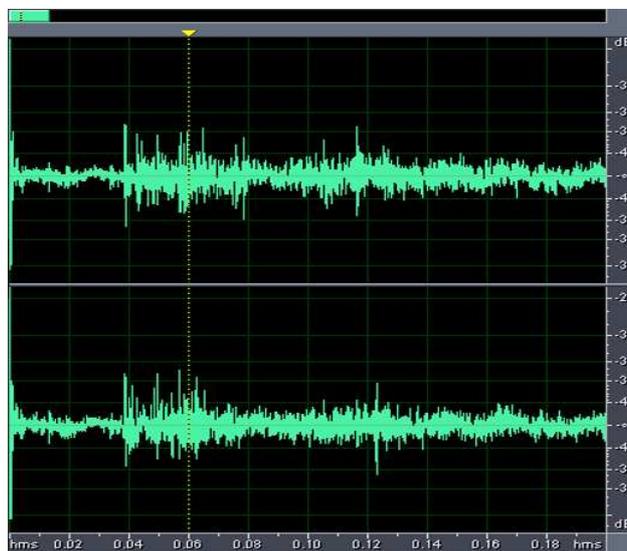


Figura 5.48: Risposta all'impulso binaurale nella posizione 30, con in evidenza la forte riflessione a circa 120 ms.

### 5.3.3 Parametro G

Le risposte all'impulso ottenute con il *DAT* sono state registrate variando il volume dei microfoni da punto a punto; dunque non è stato possibile graficare il parametro G (la variazione del volume di registrazione non influenza i valori degli altri parametri).

### 5.3.4 Parametro di spazialità IACC

Nelle figure 5.49 e 5.50 sono mostrati i grafici di IACC mediato rispettivamente su tutte le posizioni e sui diversi settori in funzione della frequenza, mentre in figura 5.51 è mostrata la mappa di  $1 - IACC_{E3}$ .

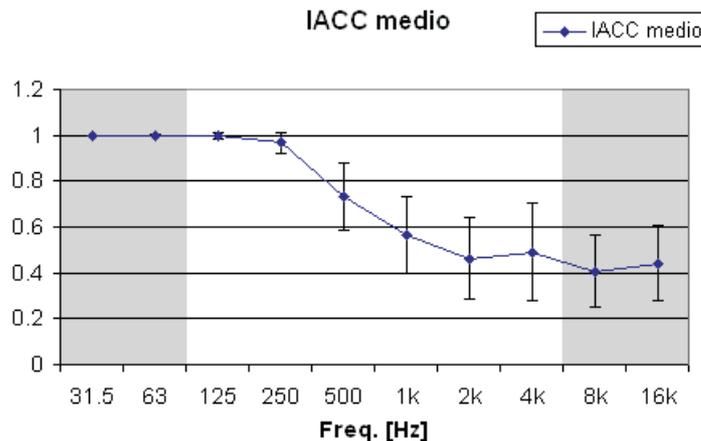


Figura 5.49: Media di IACC sulle posizioni di misura del *DAT* e del piatto rotante.

Come già accennato nel paragrafo , secondo Beranek [5] il parametro  $1 - IACC_{E3}$  (chiamato anche *BQI*, *Binaural Quality Index*) è molto ben correlato con la qualità acustica di una sala da concerto, se gli altri parametri rientrano in limiti ragionevoli (tempi di riverberazione a sala piena intorno ai 2 s, buon livello acustico dei bassi,  $C_{80}$  alle medie frequenze tra 0 e -4 dB, etc..). Questa peculiarità può essere verificata nella fig. 5.52, in cui sulle ascisse sono poste alcune tra le migliori sale al mondo in ordine decrescente di qualità acustica (valutata in base a questionari), e sulle ordiante il valore medio di BQI nella sala. Stando a questi dati, la sala S. Cecilia, con un valor medio misurato di 0.42, non può essere considerata tra le migliori; tuttavia nel grafico si nota che alcune sale (Amsterdam Concertgebouw, Tokyo Suntory Hall e Berlino Philharmonie Hall, mostrata nella fig.5.53), denominate

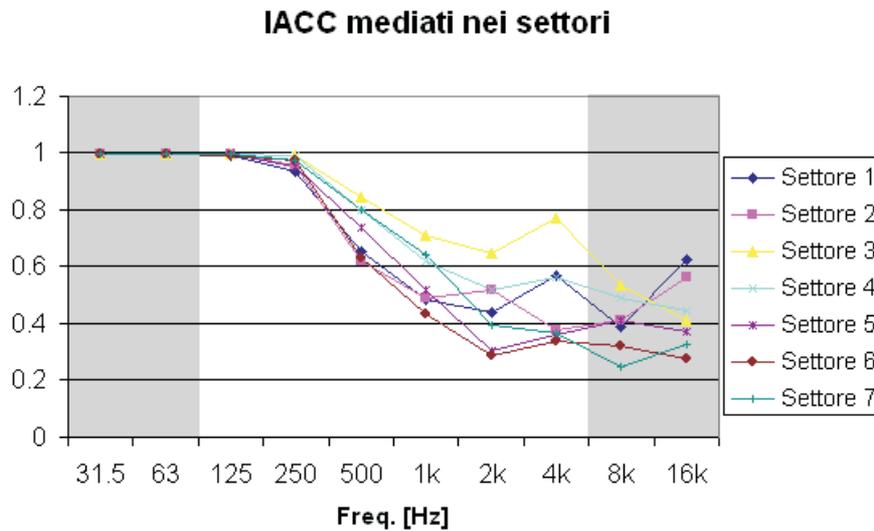


Figura 5.50: Media di IACC nei diversi settori della sala.

*Surround Halls* (Sale avvolgenti), come la S. Cecilia hanno terrazze a vigneto che circondano la platea e pareti laterali non parallele. Beranek giustifica l'alta qualità acustica attribuita a queste sale dagli esperti considerando che generalmente gli esperti stessi valutano le sale occupando i posti di fronte all'orchestra. In effetti, la mappa di BQI attribuisce ai posti di fronte all'orchestra un valore di 0.6, che rientra tra i valori ottimi per questo parametro. Anche altre zone della sala registrano un BQI intorno a 0.6, come le balconate laterali e quelle centrali più vicine al palco, mentre invece le balconate che circondano il palco hanno un valore molto basso del parametro.

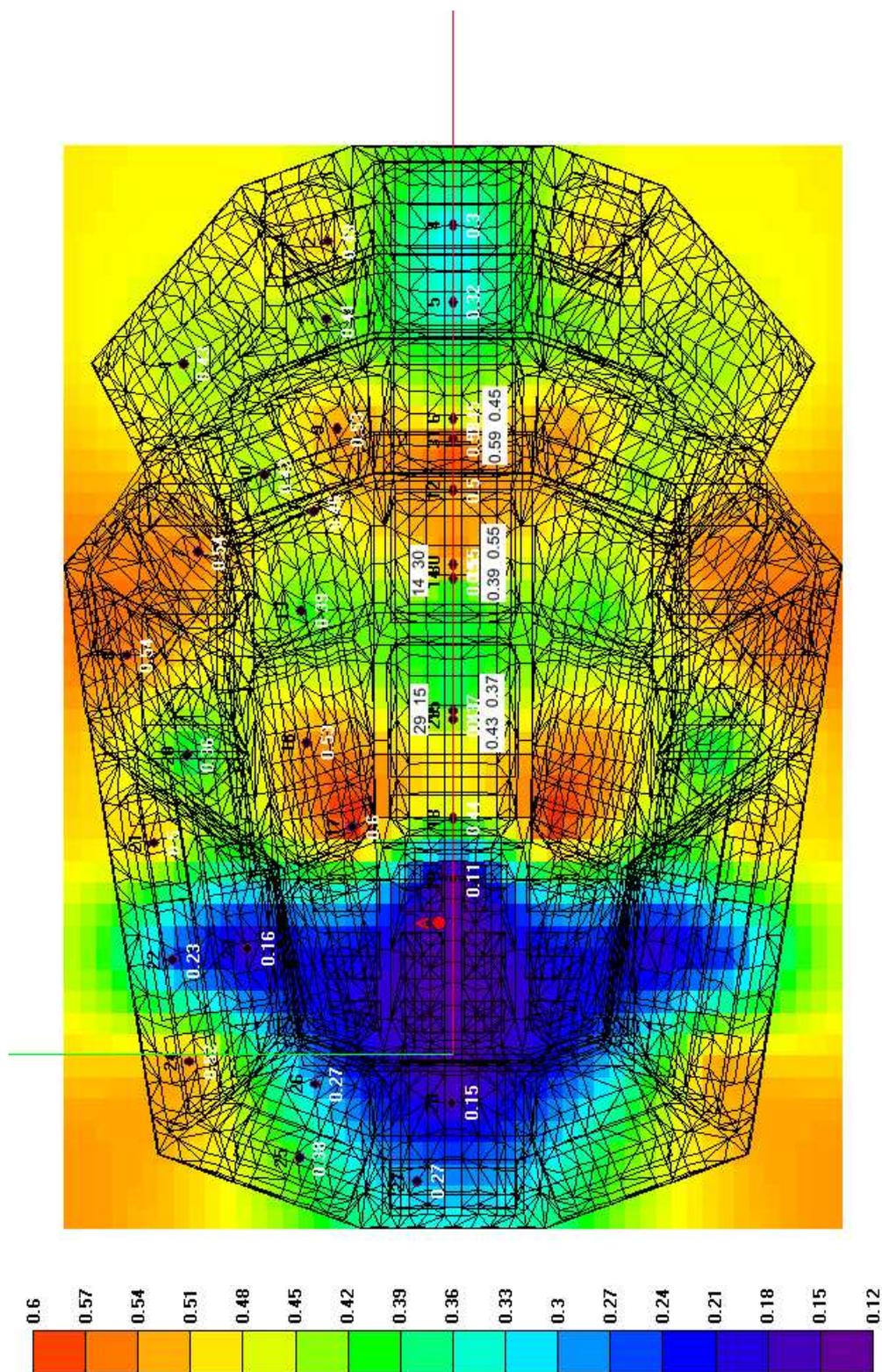


Figura 5.51: Mappa di  $1 - IACC_{E3}$  nella sala.

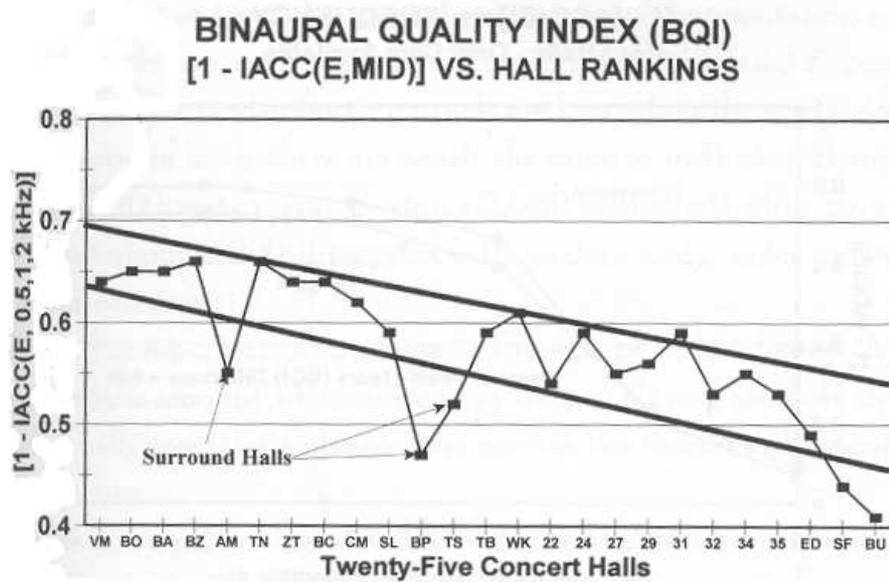


Figura 5.52: Grafico di BQI di molte sale del mondo ordinate per qualità.

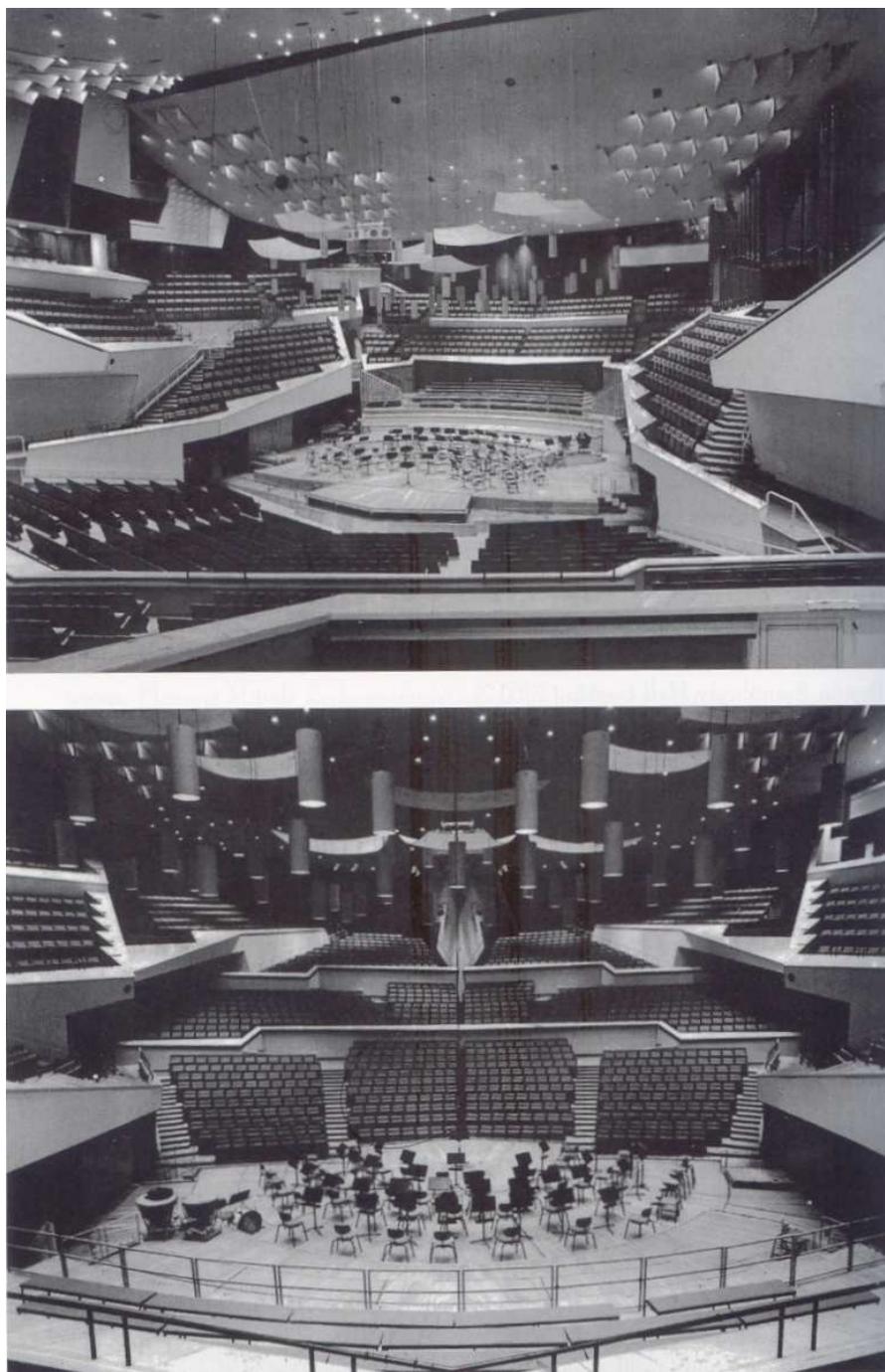


Figura 5.53: La sala Philharmonie Hall di Berlino.

## 5.4 Il modello digitale

Il modello digitale tridimensionale utilizzato per la simulazione della propagazione acustica all'interno della sala è stato costruito con il programma *Autodesk AutoCAD* a partire da piante e sezioni bidimensionali *as built* (a costruzione ultimata) gentilmente concessi dalla società "Musica Per Roma", che gestisce il complesso Parco Della Musica.

Come già accennato nel paragrafo 4.4.7, il progetto è stato costruito utilizzando soltanto entità di superficie *3DFaces*, ed è stato ideato trascurando i particolari di dimensione inferiore ai 40 cm, in quanto l'algoritmo di *Pyramid Tracing* è ideato in modo da rendere inutile una precisione maggiore nel disegno. Il modello definitivo è formato da ben 6182 entità, costituite di 9 materiali differenti.

La taratura del modello è stata effettuata per rendere i risultati delle simulazioni congruenti con i dati sperimentali; dato che non è stato possibile disporre dei valori esatti dei coefficienti di assorbimento dei materiali della sala, si sono utilizzati dei coefficienti di materiali simili, riadattandoli leggermente in modo da ottenere dei risultati compatibili con le misure.

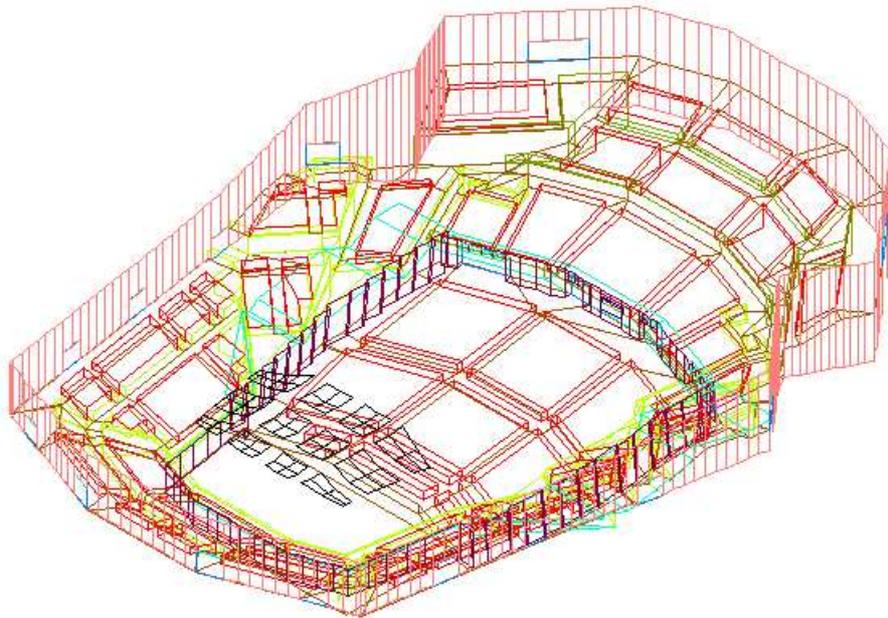


Figura 5.54: Immagine dell'interno del modello della sala.

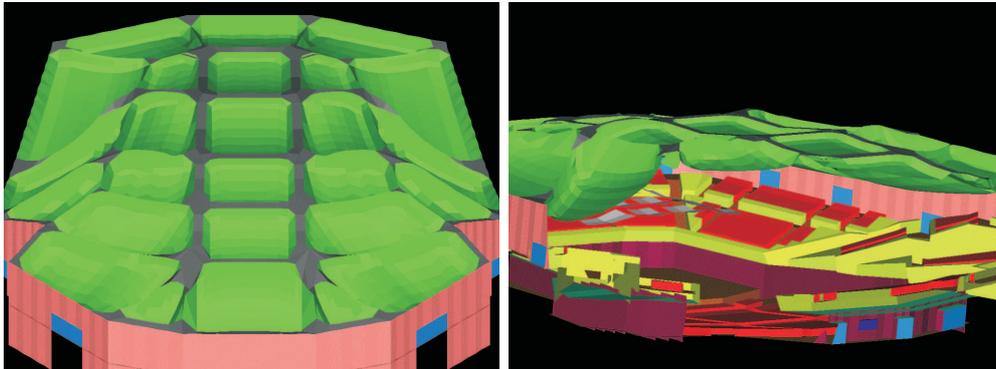


Figura 5.55: Immagini del *rendering* del modello della sala.

## 5.5 Risultati delle simulazioni e confronti con le misurazioni

Vengono qui presentati i risultati delle simulazioni confrontati con le misurazioni effettuate in sala. La descrizione di ogni parametro comprende un grafico che ne raffigura l'andamento medio in funzione della frequenza (in banda d'ottava), comparandolo con quello delle misurazioni; inoltre è presentata, per ogni parametro, una mappa di distribuzione all'interno della sala alla frequenza rappresentativa di 500 Hz.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando un livello di suddivisione di 10 (pari a  $2^{13} = 8192$  piramidi); la lunghezza della risposta all'impulso ottenuta è di 5 s, con una risoluzione temporale di 1 ms.

### 5.5.1 Tempi di riverberazione

Nelle fig. 5.56, 5.57 e 5.58 è raffigurato l'andamento in funzione della frequenza dei valori medi rispettivamente dei parametri  $T_{20}$ ,  $T_{30}$  e EDT, confrontando i risultati ottenuti con la simulazione con i valori misurati in sala. Dai grafici si nota un'ottima corrispondenza sia di  $T_{20}$  sia di  $T_{30}$  tra i risultati della simulazione e quelli delle misurazioni; l'EDT risulta invece leggermente più basso nella simulazione rispetto alle misurazioni. Nelle fig. 5.59, 5.60 e 5.61 sono rappresentate le mappe degli stessi parametri alla frequenza di 500 Hz; paragonandole con le mappe degli stessi parametri misurati (par. 5.3.1), si nota come le differenze dei primi due parametri da punto a punto siano estremamente piccole anche nelle simulazioni. Se si calcola la differenza media  $\langle \Delta p \rangle$  (in modulo) tra il parametro misurato ( $p_{nmis}$ ) e il parametro

simulato ( $p_{nsim}$ ) in tutti i punti della sala:

$$\langle \Delta p \rangle = \frac{\sum_n |p_{nmis} - p_{nsim}|}{N}, \quad (5.1)$$

si ottiene per  $\langle \Delta T_{20} \rangle$  e  $\langle \Delta T_{30} \rangle$  a 500 Hz rispettivamente 0.06 e 0.05 s. Considerando che la minima differenza percettibile da un orecchio medio per i tempi di riverberazione è pari al 5% del valore del parametro [3], e quindi circa 0.13 s, si nota come il risultato medio ne sia ben al di sotto.

L'EDT invece ha un errore medio  $\langle \Delta EDT \rangle$  pari a 0.19 s, leggermente maggiore della soglia di udibilità. La tabella 5.1 riassume quanto detto in precedenza.

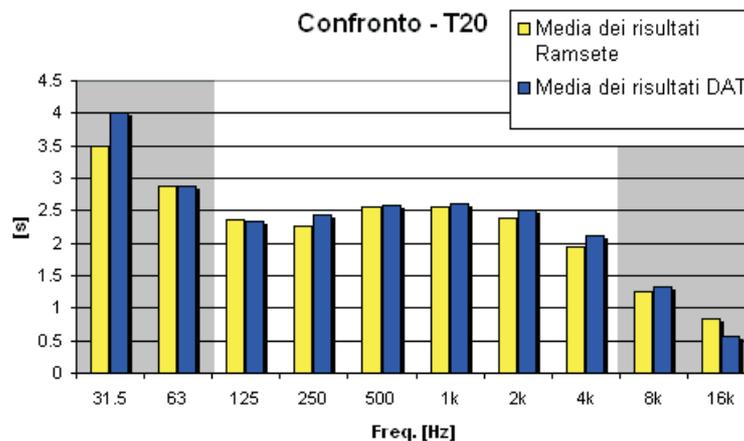


Figura 5.56: Confronto tra  $T_{20}$  medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza. Le bande in grigio si riferiscono alle frequenze nelle quali i microfoni sono meno precisi.

Parametro	$T_{20}$ [s]	$T_{30}$ [s]	$EDT$ [s]
Valor medio con <i>Ramsete</i>	2.55	2.59	2.33
Valor medio misurato	2.57	2.56	2.56
Minima differenza percettibile	0.13	0.13	0.13
$\langle \Delta p \rangle$	0.06	0.05	0.19

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva di confronto tra le misurazioni e la simulazione per i tempi di riverberazione a 500 Hz.

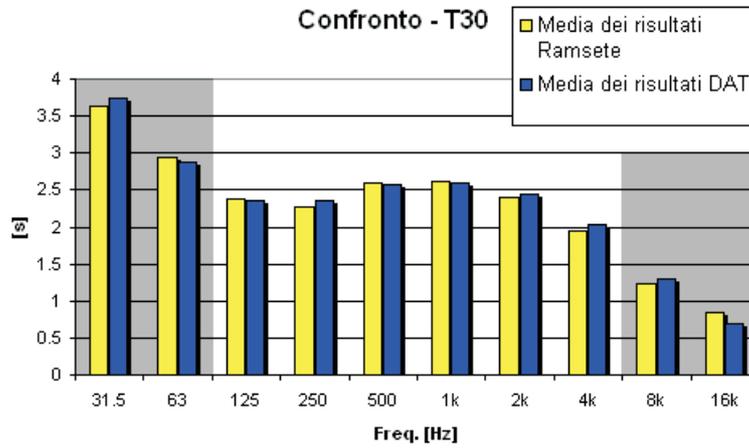


Figura 5.57: Confronto tra  $T_{30}$  medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza.

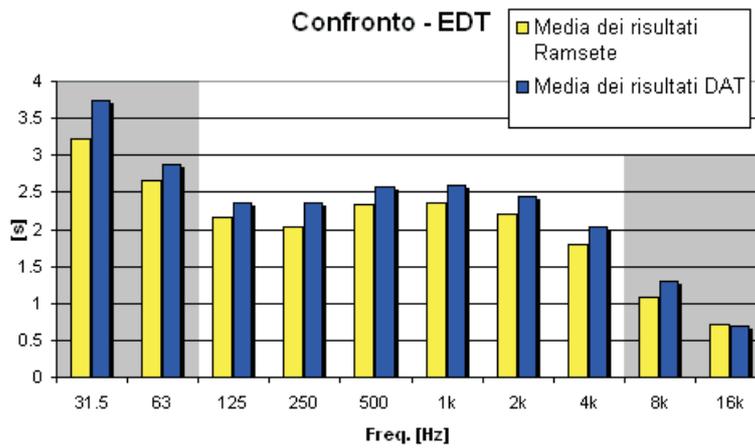


Figura 5.58: Confronto tra EDT medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza.



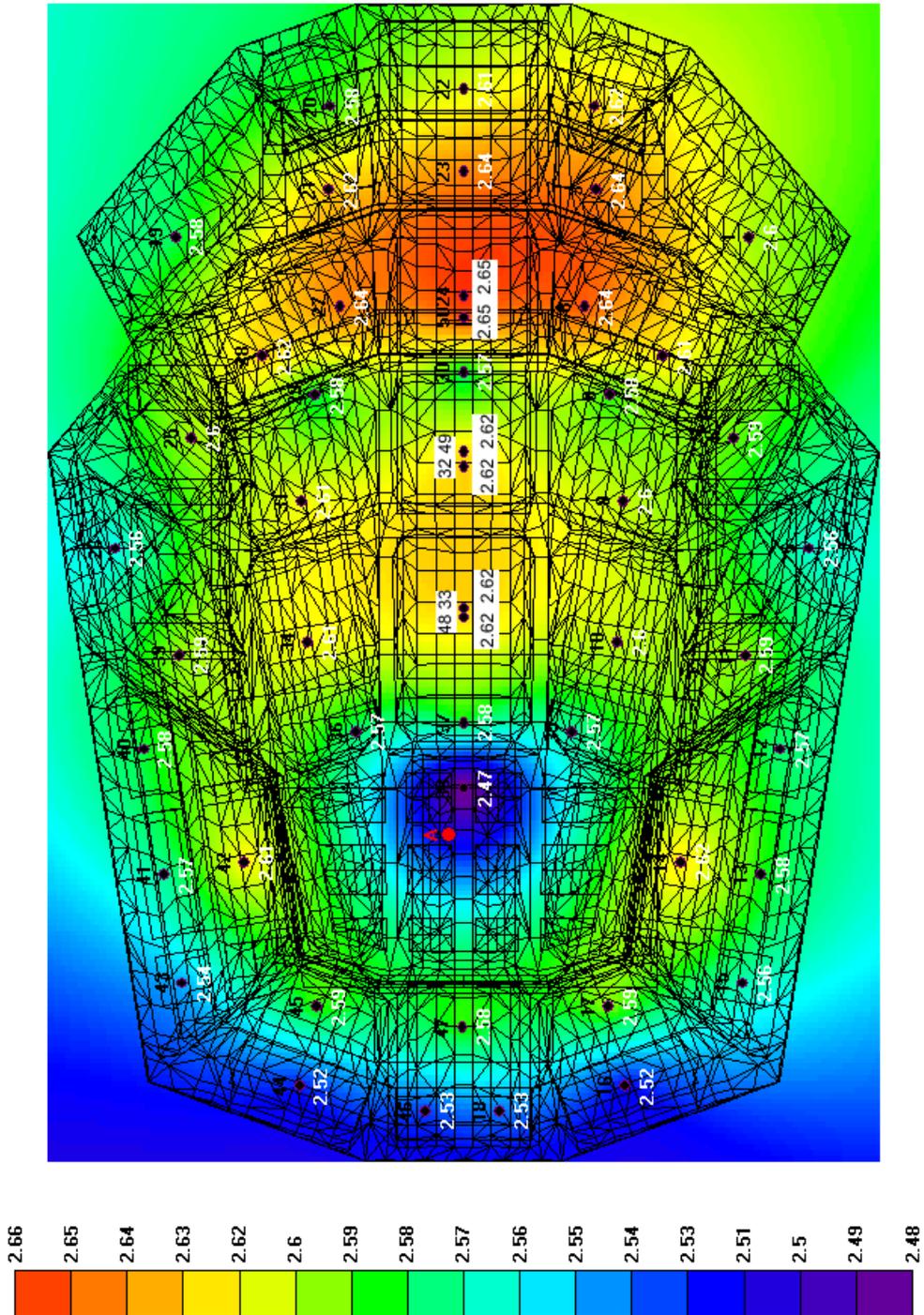


Figura 5.60: Mappa di  $T_{30}$  ottenuta con *Ramsete*.

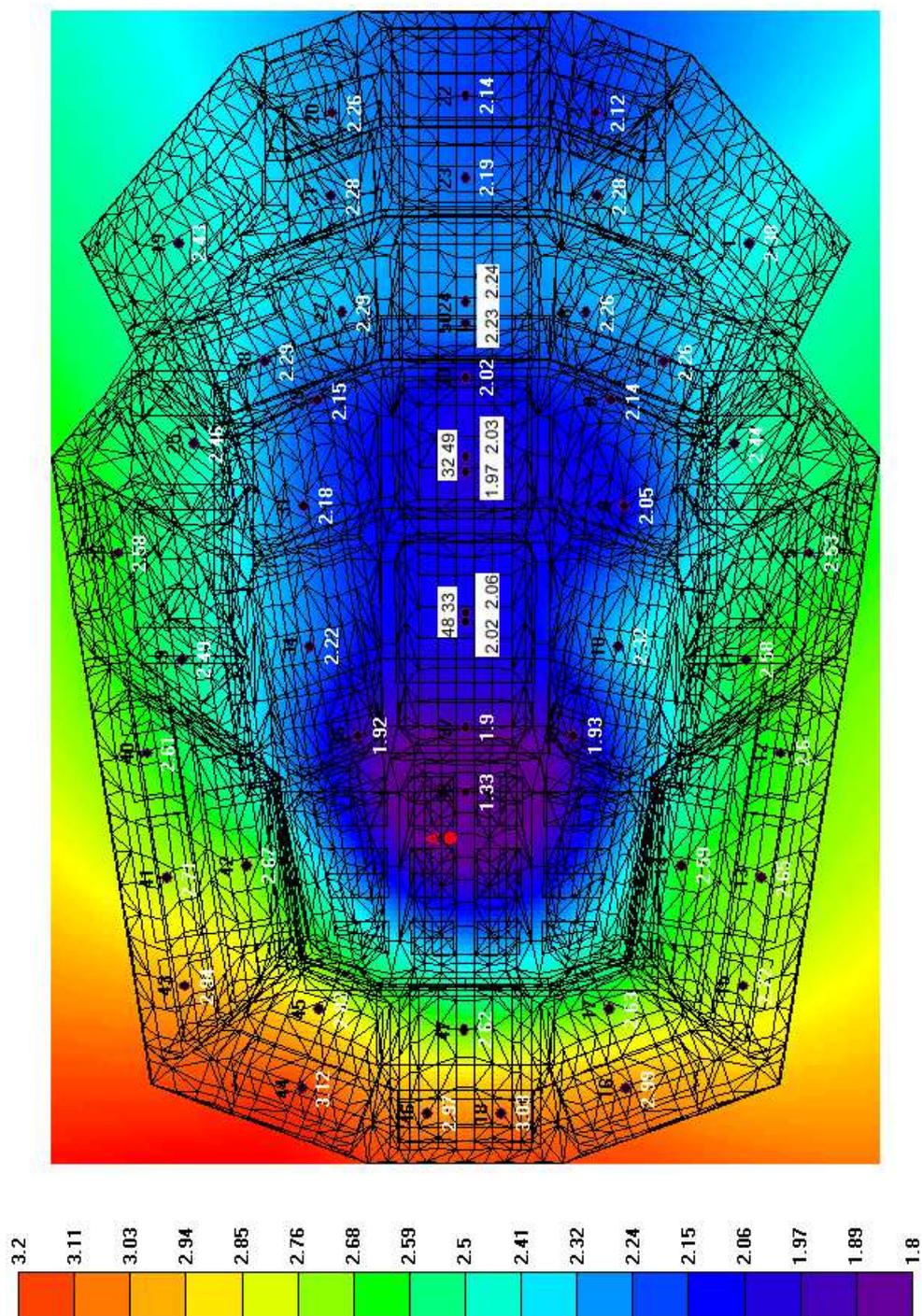


Figura 5.61: Mappa di EDT ottenuta con *Ramsete*.

### 5.5.2 Parametri di chiarezza e tempo baricentrico

Le figure dalla 5.62 alla 5.67 rappresentano l'andamento in frequenza dei parametri medi  $C_{50}$ ,  $C_{80}$  e  $T_s$  risultanti dalle simulazioni (sempre confrontati con le misurazioni) e le mappe dei medesimi parametri a 500 Hz.

I grafici mostrano che valori di  $C_{50}$  della simulazione sono in media leggermente più bassi di quelli effettivamente misurati, mentre con  $C_{80}$  le differenze sembrano appianarsi fortemente; anche il grafico di  $T_s$  evidenzia dei valori del parametro molto confrontabili tra simulazione e misurazioni. Confrontando le mappe con quelle del paragrafo 5.3.2, appare chiaro che la simulazione prevede molto bene il comportamento di  $T_s$  all'interno della sala, e leggermente peggio quello degli altri due parametri. Inoltre la tabella 5.2 espone il confronto fra le misurazioni e la simulazione a 500 Hz; le differenze sono leggermente al di sopra della soglia di udibilità.

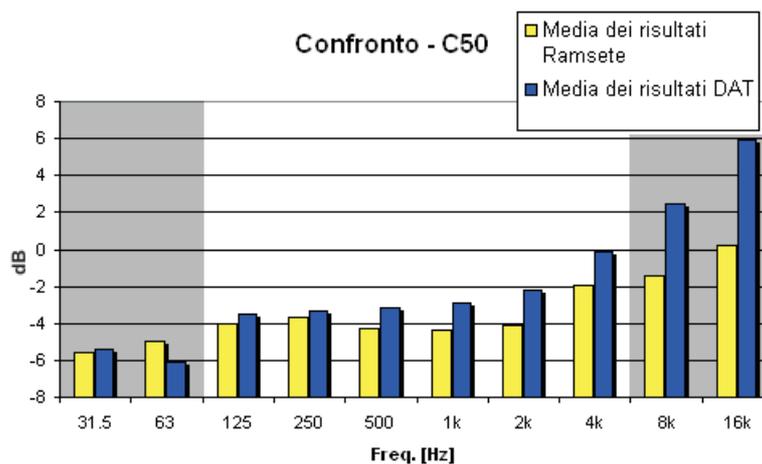


Figura 5.62: Confronto tra  $C_{50}$  medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza. Le bande in grigio si riferiscono alle frequenze nelle quali i microfoni sono meno precisi.

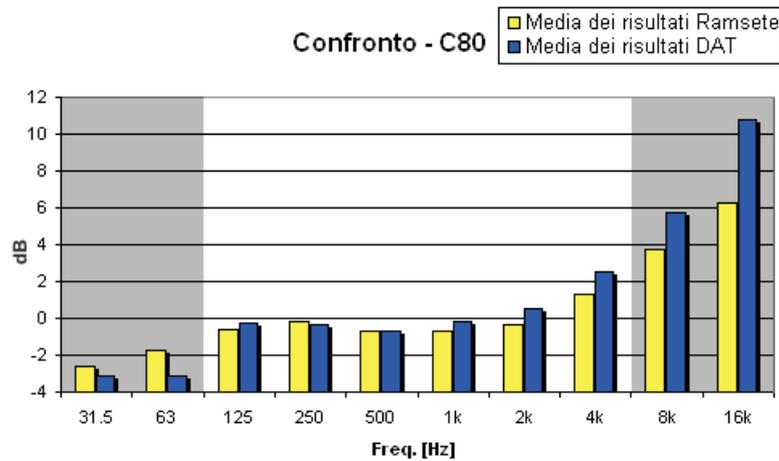


Figura 5.63: Confronto tra  $C_{80}$  medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza.

Parametro	$C_{50}$ [dB]	$C_{80}$ [dB]	$T_s$ [ms]
Valor medio con <i>Ramsete</i>	-4.27	-0.72	152.76
Valor medio misurato	-3.19	-0.73	145.60
Minima differenza percettibile	1	1	10
$\langle \Delta p \rangle$	1.73	1.38	19.25

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva di confronto tra le misurazioni e la simulazione per i tempi di riverberazione a 500 Hz.

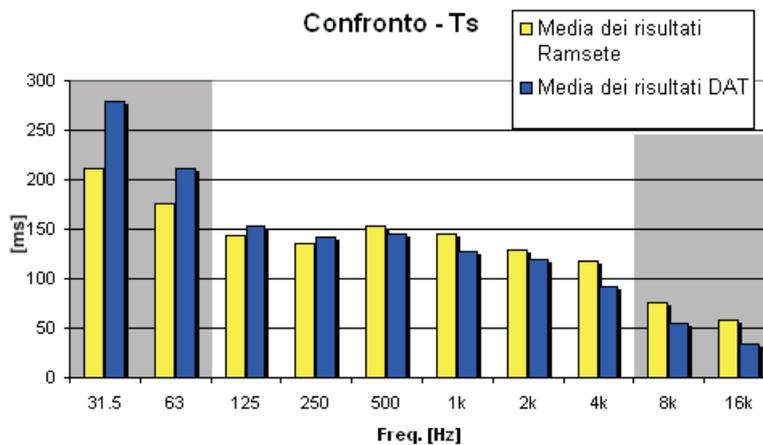


Figura 5.64: Confronto tra  $T_s$  medio misurato dal *DAT* e ottenuto con la simulazione con *Ramsete* sulle stesse posizioni al variare della frequenza.

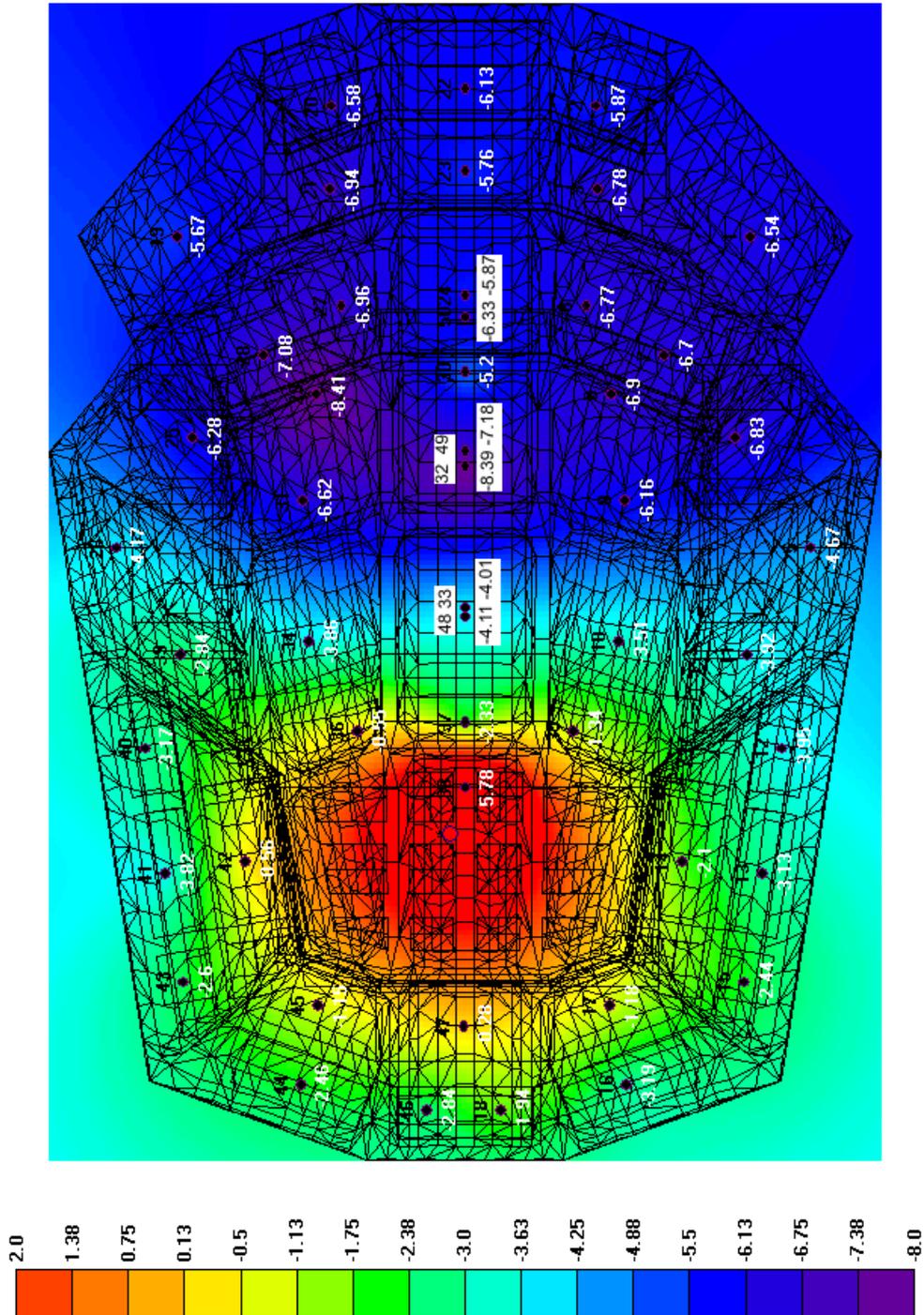


Figura 5.65: Mappa di  $C_{50}$  ottenuta con *Ramsete*.

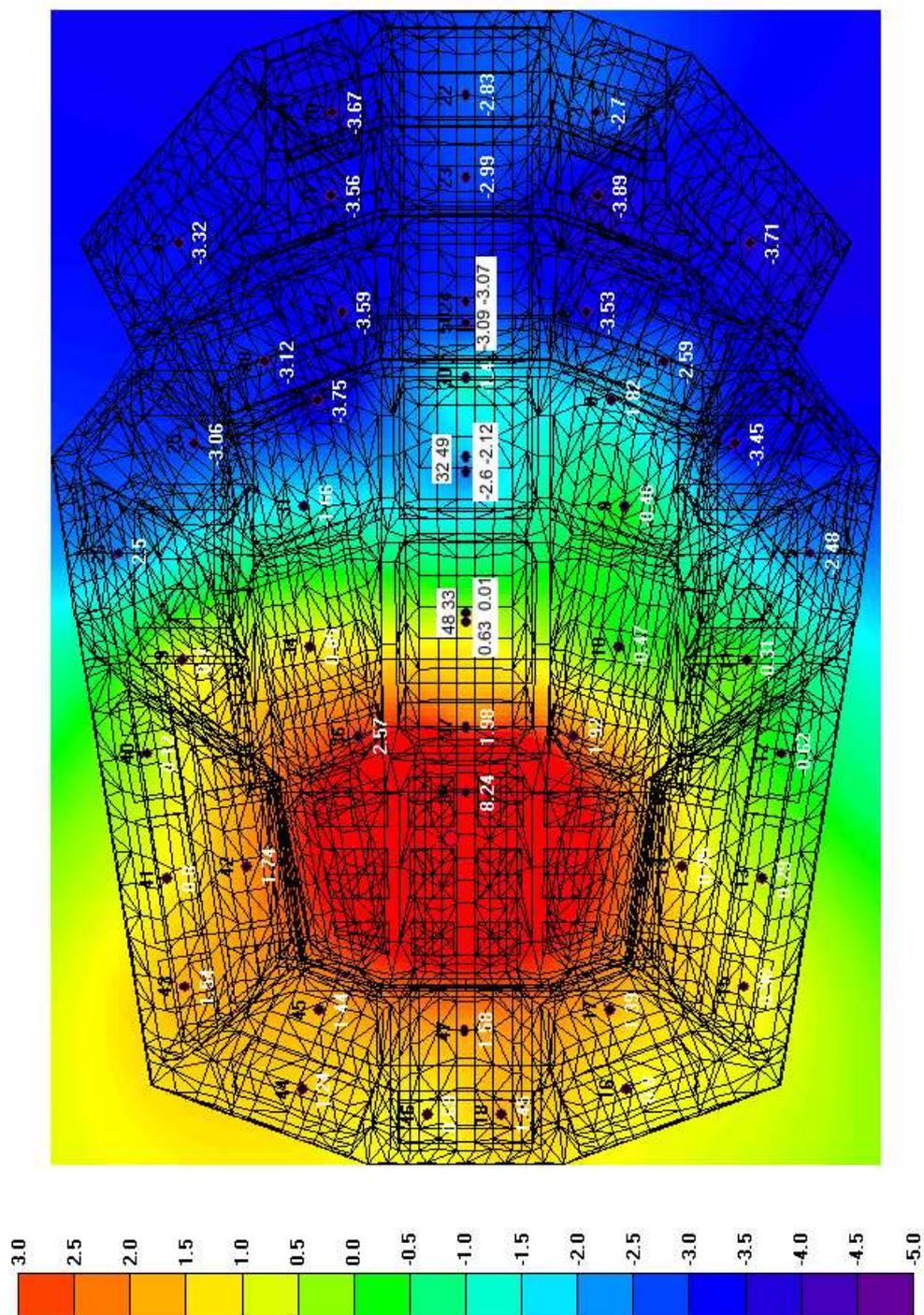


Figura 5.66: Mappa di  $C_{80}$  ottenuta con *Ramsete*.



### 5.5.3 Parametro G

Le figure 5.68 e 5.69 mostrano rispettivamente il grafico del parametro G medio in funzione della frequenza e la mappa di G a 500 Hz disegnata con *Ramsete*. Non disponendo di valori di G misurati validi (cfr. par. 5.3.3), non è stato possibile fare un confronto tra misurazioni e simulazione; dalla mappa comunque si deduce una distribuzione del parametro molto graduale, decrescente con la distanza dal palco, pur mantenendosi abbastanza elevato anche lontano dalla sorgente.

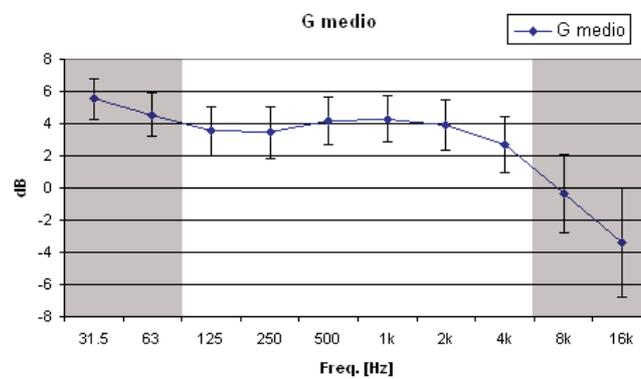


Figura 5.68: Andamento di G medio in funzione della frequenza ottenuto con *Ramsete*.

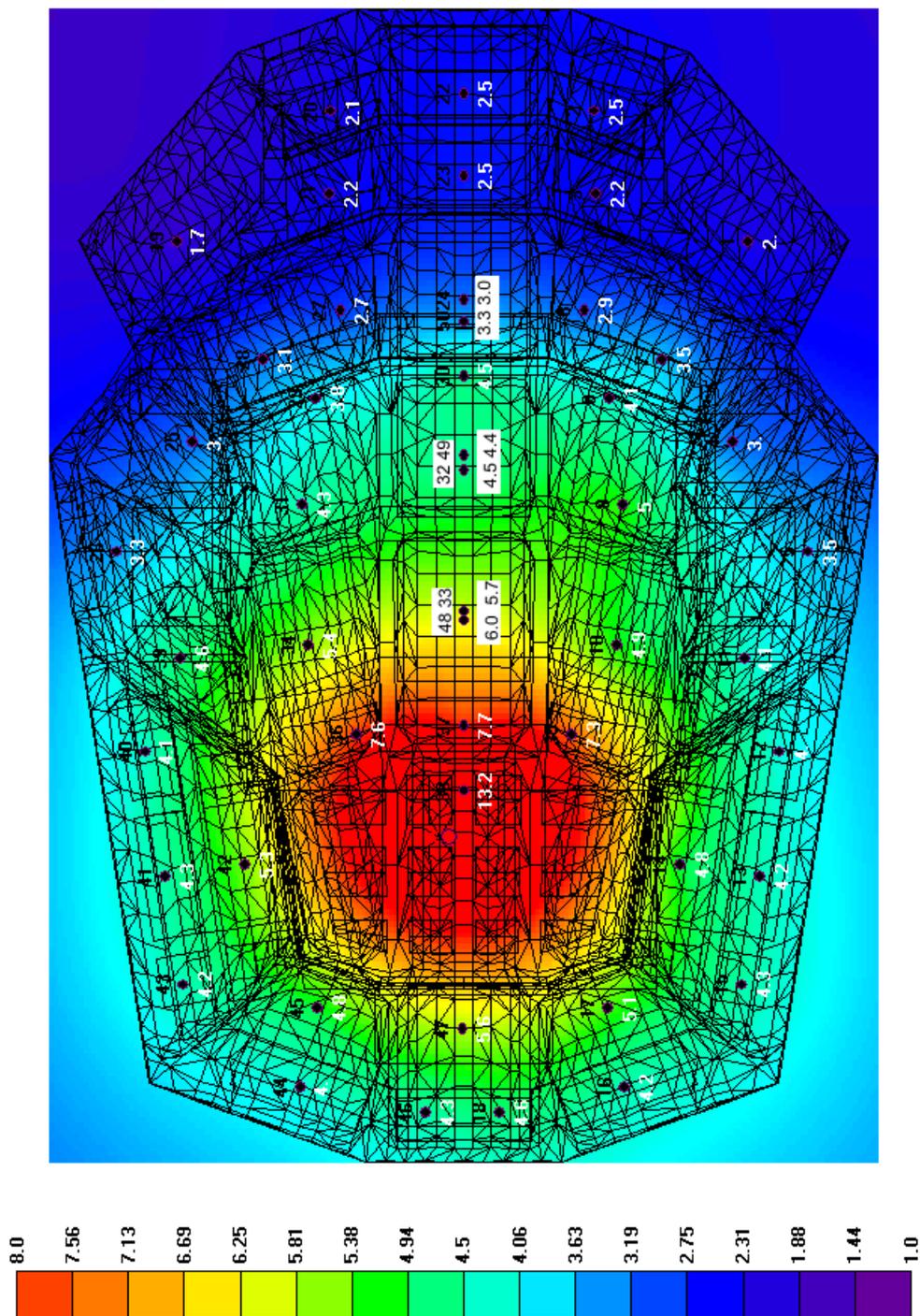


Figura 5.69: Mappa di G ottenuta con *Ramsete*.

## 5.6 Utilizzo del modello

Il modello costruito può essere utilizzato per molteplici scopi: se esso è accurato, ad esempio, può servire per prevedere gli effetti acustici di un cambiamento strutturale della sala (come l'installazione di pannelli fonodiffondenti o teli fonoassorbenti, oppure il cambiamento del coefficiente di assorbimento di una parete) per migliorarla o per adattarla ad un genere musicale diverso da quello per cui era stata ideata; inoltre può essere utile per rintracciare eventuali focalizzazioni acustiche o echi indesiderati. Ad esempio nel paragrafo 5.3.2 si è visto come una forte riflessione disturbi la chiarezza nelle posizioni al centro della platea; andando ad analizzare la risposta all'impulso simulata (fig. 5.70), si vede come il disturbo in realtà sia causato da alcune riflessioni (provenienti dai lati e dal fondo della sala) che sopraggiungono in un piccolo intervallo di tempo, causando un leggero effetto di focalizzazione.

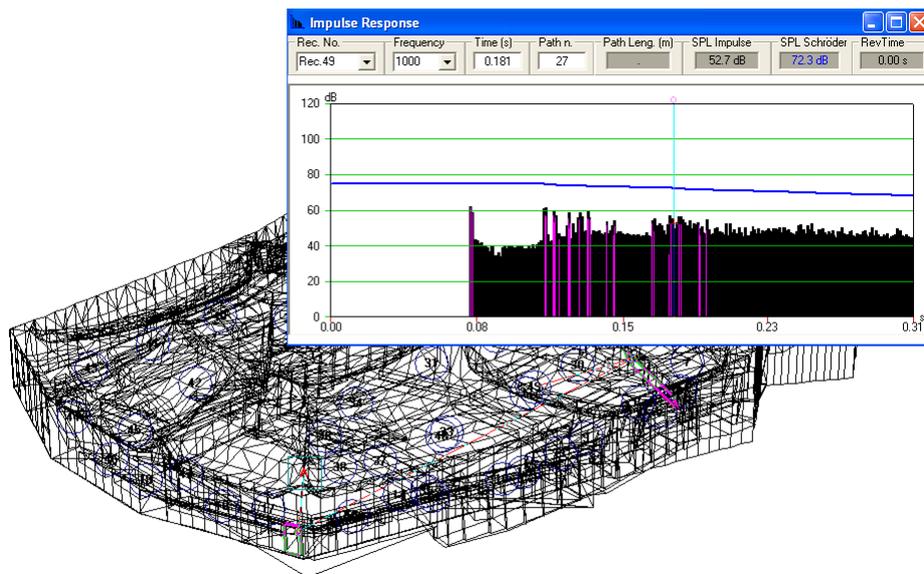


Figura 5.70: Analisi della risposta all'impulso al centro della platea, in cui si evidenziano tarde riflessioni.

# Capitolo 6

## Conclusioni

L'acustica architettonica è una disciplina a cavallo tra fisica, architettura e musica, ed è una materia in continua evoluzione; questa tesi di laurea va ad inserirsi in un contesto di studio (purtroppo non molto sviluppato in Italia) delle sale adibite all'ascolto della musica. Il lavoro svolto ha consentito di ottenere una caratterizzazione approfondita ed esauriente della sala Santa Cecilia del nuovo auditorium Parco della Musica in Roma, e in particolare sono stati sviluppati i seguenti punti:

- è stata effettuata una campagna di misurazioni con piatto rotante, come descritto nel paragrafo 4.3.2. Ciò ha reso possibile (nei punti in cui è stata effettuata la misurazione) l'acquisizione di risposte all'impulso sull'intero angolo giro, allo scopo di ottenere una descrizione polare dei parametri di spazialità. L'analisi dei risultati ha messo in evidenza sia comportamenti diversi tra LF e  $IACC_A$ , sia leggeri effetti di polarizzazione del secondo parametro;
- sono stati graficati gli andamenti in funzione della frequenza e in funzione della posizione dei principali parametri descrittivi dell'acustica architettonica. I risultati indicano una distribuzione molto uniforme dei parametri di riverberazione (in particolare  $T_{20}$  e  $T_{30}$ ), e valori degli indici di chiarezza conformi con gli standard delle sale da musica sinfonica. È stata inoltre disegnata la mappa del parametro  $IACC_{E3}$ , che si è provato essere molto ben correlato con la qualità soggettiva della sala; da essa si evidenziano zone in cui il suddetto parametro ha un valore abbastanza elevato, e paragonabile con il valore ottenuto nelle migliori sale da concerto del mondo, e zone in cui il suo valore è nettamente più basso, in particolare nelle tribune intorno al palco (zone che risultano "patologiche" anche in altre sale con architettura simile alla Santa Cecilia);

- è stato costruito un modello tridimensionale della sala e si è effettuata una simulazione della propagazione acustica nella sala stessa, con risultati molto buoni: i valori dei principali parametri risultano coerenti con quelli ottenuti dalle misurazioni, con scarti medi che rientrano o superano di poco il limite di udibilità.
- sono state effettuate numerose auralizzazioni con brani sinfonici e solistici, ovviamente non riproducibili sulla presente copia cartacea, al fine di confrontare le analisi realizzate con le sensazioni soggettive.

Il lavoro svolto in questa tesi potrà essere in futuro ulteriormente sviluppato e ampliato. In primo luogo, potrà essere effettuata un'analisi ancor più approfondita dei parametri ottenuti, in special modo per quelli relativi agli aspetti spaziali delle registrazioni con piatto rotante, eventualmente con uno sfondo teorico non ancora sviluppato. Inoltre il modello della sala può essere ulteriormente perfezionato utilizzando i valori veri dei coefficienti d'assorbimento dei materiali presenti all'interno della sala, anche se esso può essere usato così com'è per stimare l'effetto sull'acustica di interventi mirati a modificarla (ad esempio allo scopo di renderla adatta anche a generi musicali diversi dalla musica sinfonica).

# Bibliografia

- [1] M. Schroeder. New method of measuring reverberation time. *Journal of Acoustical Society of America*, 37, 1965.
- [2] A. Cocchi, A. Cirillo, A. Farina, M. Garai, and G. Semprini. Requisiti e parametri acustici degli ambienti per l'ascolto della musica e della parola. *Corso per tecnici in acustica, Scuola di Acustica, Università di Ferrara*, 1999.
- [3] S. Cingolani and R. Spagnolo. *Acustica musicale e architettonica*. UTET Libreria, 2005.
- [4] A. Farina. *La caratterizzazione acustica delle sale da spettacolo con particolare attenzione alle esigenze di ascolto della musica sinfonica*. PhD thesis, Università di Bologna, 1986.
- [5] L. L. Beranek. *Concert Hall and Opera Houses*. Springer, 2004.
- [6] L. L. Beranek. *Music Acoustic and Architecture*. Wiley, 1962.
- [7] L. Cremer and H. A. Müller. *Principles and Application of Room Acoustics*. Applied Science Publisher, 1982.
- [8] V.L.Jordan. Einige bemerkungen über anhall und anfangsnachhall in musikräumen. *Applied Acoustics*, 1:29–36, 1968.
- [9] E.Thiele. Richtungsverteilung und zeitfolge der der schallrueckwürfe in raumen. *Acustica*, 3:291–302, 1953.
- [10] H.Haas. Über den einfluß eines einfachechos auf die harsamkeit von sprache. *Acustica*, 1:49–58, 1951.
- [11] W.Reichardt, O.Abdelalim, and W.Schmidt. Definition und meßgrundlage eines objectiven maßes zur ermittlung der grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit bei musik-darbietung. *Acustica*, 3:291–302, 1975.

- 
- [12] Y. Ando. *Concert Hall Acoustics*. Springer series in electrophysics, 1985.
- [13] A. H. Marshall and M. Barron. Spatial responsiveness in concert halls and the origins of spatial impression. *Applied Acoustics*, 62, 2001.
- [14] M. Morimoto and Z. Maekawa. Auditory spaciousness and envelopment. *Proc. 13th ICA (Belgrade)*, 1989.
- [15] T. Okano, L. L. Beranek, and T. Hidaka. Relations among interaural cross-correlation coefficient (iacc), lateral fraction (lf) and apparent source width (asw) in concert halls. *Journal of Acoustical Society of America*, 104, 1998.
- [16] J. S. Bradley and G. A. Soulodre. Objective measures of listener envelopment. *J. Acous. Soc. Am.*, 98, 1995.
- [17] H. Furuya, K. Fujimoto, C. Y. Ji, and N. Higa. Arrival direction of late sound and listener envelopment. *Applied Acoustics*, 62, 2001.
- [18] M. Morimoto, K. Iida, and K. Sakagami. The role of reflections from behind the listener in spatial impression. *Applied Acoustics*, 62, 2001.
- [19] T. Houtgast and H. J. M. Steeneken. A physical method for measuring speech-transmission quality. *J. Acous. Soc. Am.*, 61, 1980.
- [20] T. Houtgast, H. J. M. Steeneken, and R. Plomp. Prediction speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. *Acustica*, 16, 1980.
- [21] M. Schroeder. Modulation transfer function: definition and measurement. *Acustica*, 49, 1981.
- [22] A. Farina. Acoustic quality of theatres: correlation between experimental measures and subjective evaluation. *Applied Acoustics*, 2001, 62.
- [23] A. Farina and E. Ugolotti. Subjective comparison of different car audio systems by the auralization technique. *Pre-prints of the 103rd AES Convention, New York*, 1997.
- [24] C. H. Haan and F. R. Fricke. An evaluation of the importance of surface diffusivity in concert halls. *Applied Acoustics*, 1997.
- [25] A. C. Gade. Musicians' ideas about room acoustical qualities. *Report No.31. The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark*, 1981.

- 
- [26] A. Farina. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *108th AES Convention, Paris*, 2000.
- [27] A. Farina, A. Bellini, and E. Armelloni. Non-linear convolution: a new approach for the auralization of distorting systems. *110th AES Convention, Amsterdam*, 2001.
- [28] A. Farina and A. Avanzini. Registrazione della risposta acustica delle sale da concerto per i posteri. *Seminario AES-Italia, Workshop sulle tecniche di ripresa stereofoniche multicanale per le orchestre sinfoniche*, 2003.
- [29] A. Farina and S. Piva. Analisi acustica di cavità tridimensionali con tecniche agli elementi finiti. *Atti del XVIII Convegno Nazionale AIA, L'Aquila*, 1990.
- [30] A. Farina and R. Pompoli. Noise reduction in a tractor cab using resonators and active soundspeaker: Fem prediction and experimental verification. *Proceedings of 2nd International ATA Conference Vehicle Comfort*, 1992.
- [31] A. Farina. Propagazione sonora e previsione del rumore negli ambienti di lavoro. *atti del seminario rumore e vibrazioni negli ambienti di lavoro: dalla valutazione alla bonifica*, 1999.
- [32] M. Vorlander. Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *J. of Acou. Soc. of Am.*, 1989.
- [33] D. van Maercke and J. Martin. The prediction of echograms and impulse responses within the epidaure software. *Applied Acoustics*, 1993.
- [34] A. Farina. Ramsete - a new pyramid tracer for medium and large scale acoustic problems. *Proc. of EURO-NOISE 95 Conference, Lyon*, 1995.
- [35] L. L. Beranek. *Acoustics*. McGraw-Hill, 1954.
- [36] Marco Conter and Filippo Maria Fazi. Caratterizzazione acustica della sala sinopoli dell'auditorium parco della musica in roma e verifica sperimentale del modello. Master's thesis, Università di Brescia, 2005.
- [37] A. Frova. *Fisica nella musica*. Zanichelli, 1999.
- [38] A. Farina. *Manuale di Utilizzo dei Programmi CITYMAP e DISIAPYR*.