

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN
INGEGNERIA ELETTRONICA

SINTESI DI RISPOSTE ALL'IMPULSO MULTICANALE
DAI RISULTATI DI PROGRAMMI
DI SIMULAZIONE ACUSTICA

Relatore:
Chiar.mo Prof. ANGELO FARINA

Correlatori:
Dott. Ing. ANDREA CAPRA
Dott. PAOLO MARTIGNON

Tesi di laurea di:
SIMONE CAMPANINI

ANNO ACCADEMICO 2005–2006

*alla memoria di Ercole, Pellegrina,
Mario, Romilde.*

Indice

| | |
|--|-----------|
| 1 Premessa | 1 |
| 2 Richiami di acustica architettonica | 3 |
| 2.1 Introduzione | 3 |
| 2.2 La propagazione del suono negli spazi chiusi | 3 |
| 2.2.1 La teoria modale | 4 |
| 2.2.2 La teoria statistica | 9 |
| 2.3 Descrittori acustici oggettivi | 15 |
| 2.3.1 Il tempo di riverbero | 16 |
| 2.3.2 Indici di definizione e chiarezza | 19 |
| 2.3.3 L'indice di robustezza | 20 |
| 2.3.4 Parametri spaziali | 21 |
| 2.3.5 L' <i>Acoustic Quality Test</i> | 24 |
| 3 Tecniche di misura | 27 |
| 3.1 Le risposte all'impulso | 27 |
| 3.2 L'integrale di Schroeder | 30 |
| 3.3 Principali metodi di misura della risposta all'impulso | 33 |
| 3.3.1 Misura con segnale impulsivo | 33 |
| 3.3.2 La tecnica <i>Time Reversal Mirror</i> | 33 |
| 3.3.3 Convoluzione inversa nel dominio della frequenza | 34 |
| 3.3.4 I segnali MLS | 35 |
| 3.3.5 I segnali <i>Sine Sweep</i> | 36 |
| 4 Modelli previsionali numerici del campo acustico | 41 |
| 4.1 Il metodo geometrico | 41 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.1 | La riflessione | 42 |
| 4.1.2 | La diffusione | 45 |
| 4.1.3 | La risposta all'impulso energetica | 47 |
| 4.2 | Algoritmi di tracciamento | 48 |
| 5 | L'auralizzazione | 55 |
| 5.1 | Il filtraggio di segnali anecoici | 55 |
| 5.1.1 | Il caso binaurale | 56 |
| 5.1.2 | Sistemi <i>Head Tracking</i> | 58 |
| 5.1.3 | Il caso <i>Ambisonic</i> | 59 |
| 5.2 | La sintesi di risposte all'impulso | 63 |
| 5.2.1 | Il software <i>AudioConverter</i> | 65 |
| 5.2.2 | Un'altra strada: il <i>burst</i> sinusoidale | 67 |
| 5.3 | Sintesi multicanale | 73 |
| 5.3.1 | Risposte all'impulso binaurali | 73 |
| 5.3.2 | Risposte all'impulso <i>B-Format</i> | 76 |
| 5.4 | Alcuni risultati | 79 |
| 6 | Casi di studio | 81 |
| 6.1 | L'abitacolo di un'autovettura | 81 |
| 6.2 | La chiesa di San Vitale | 85 |
| 6.2.1 | Disegno e taratura | 88 |
| 6.2.2 | La correzione acustica | 90 |
| 6.2.3 | Il progetto scelto | 96 |
| 6.2.4 | Possibili reimpieghi | 100 |
| 7 | Conclusioni | 107 |
| A | Definizioni | 109 |
| A.1 | Propagazione di onde sonore | 109 |
| A.2 | Impedenza acustica e <i>Complex Reflection Factor</i> | 111 |
| A.3 | Intensità, densità di energia e potenza | 112 |
| A.4 | Livelli sonori | 113 |
| A.5 | Curve di ponderazione | 115 |
| A.6 | Trasformata di Fourier | 116 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| A.7 Trasformata di Hadamard | 117 |
|---------------------------------------|-----|

Elenco delle figure

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Modello di ambiente a parallelepipedo di dimensioni l_x , l_y e l_z | 5 |
| 2.2 | Curva di risonanza di un modo normale di frequenza f_n | 8 |
| 2.3 | Tempo di riverbero in funzione del volume per alcune tipologie di ambienti. | 18 |
| 2.4 | Tracciato <i>AQT</i> | 25 |
| 2.5 | Dettaglio del tracciato <i>AQT</i> di figura 2.4. | 26 |
| 3.1 | Modello di un sistema lineare tempo-invariante. | 28 |
| 3.2 | Esempio di risposta all'impulso. | 29 |
| 3.3 | Esempio di risposta all'impulso energetica (ecogramma) e dettaglio delle prime riflessioni. | 30 |
| 3.4 | Ricostruzione della risposta all'impulso mediante integrazione di Schroeder. | 32 |
| 3.5 | Esempio di registro a scorrimento a 4 bit. | 35 |
| 3.6 | Dettaglio di un segnale di tipo <i>Sine Sweep</i> esponenziale. | 37 |
| 3.7 | Filtro inverso di un segnale di tipo <i>Sine Sweep</i> esponenziale. | 38 |
| 3.8 | Risposta all'impulso determinata con la tecnica <i>Sine Sweep</i> | 39 |
| 4.1 | Riflessione speculare a) e costruzione della sorgente immagine b). | 44 |
| 4.2 | Costruzione di sorgenti immagini del primo e secondo ordine. | 44 |
| 4.3 | Schematizzazione dei fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione di un'onda sonora. | 46 |
| 4.4 | Riflessione diffusa di un elemento dS di superficie irregolare. | 47 |
| 4.5 | Risposta all'impulso energetica: riflessioni al trascorrere del tempo. | 48 |
| 4.6 | <i>Ray-tracing</i> : schematizzazione dell'“impatto” di un raggio con il ricevitore. | 50 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.7 | <i>Cone-tracing</i> : sovrapposizione dei fasci. | 51 |
| 4.8 | <i>Pyramid-tracing</i> : generazione dei fasci mediante suddivisione della superficie sferica. | 52 |
| 5.1 | <i>Head Related Transfer Function</i> : schema della percezione umana. | 58 |
| 5.2 | Testa per registrazioni binaurali di fabbricazione <i>Neumann</i> | 59 |
| 5.3 | Catena di riproduzione di un sistema <i>Ambisonic</i> | 61 |
| 5.4 | Diagrammi polari delle quattro capsule <i>B-Format</i> | 62 |
| 5.5 | Collocazione fisica delle capsule secondo le specifiche <i>A-Format</i> . . | 62 |
| 5.6 | Microfono <i>SoundField</i> | 63 |
| 5.7 | Confronto tra tempo di campionamento di <i>Ramsete</i> e quello, inferiore, della risposta all'impulso audio desiderata. | 65 |
| 5.8 | Risposta all'impulso calcolata con <i>AudioConverter</i> e dettaglio delle prime riflessioni. | 68 |
| 5.9 | Spettro della risposta all'impulso di figura 5.8. | 69 |
| 5.10 | Raccordo tra due <i>burst</i> successivi. | 72 |
| 5.11 | Sintesi della risposta all'impulso: processo di <i>finestratura</i> nel tempo di un <i>burst</i> | 72 |
| 5.12 | Sintesi della risposta all'impulso: processo di accostamento e sovrapposizione dei <i>burst</i> | 73 |
| 5.13 | La stessa risposta all'impulso di figura 5.8 calcolata col metodo delle sinusoidi e dettaglio delle prime riflessioni. | 74 |
| 5.14 | Spettro della risposta all'impulso di figura 5.13. | 75 |
| 5.15 | Scomposizione del vettore \vec{I} lungo le tre direzioni. | 77 |
| 5.16 | T_{20} : confronto tra <i>getIR</i> e <i>Audio Converter</i> , errori medi per banda (riferimento <i>Ramsete View</i>). | 80 |
| 5.17 | C_{80} : confronto tra <i>getIR</i> e <i>Audio Converter</i> , errori medi per banda (riferimento <i>Ramsete View</i>). | 80 |
| 6.1 | Diagramma di flusso del processo ibrido di sintesi di risposte all'impulso. | 82 |
| 6.2 | Modello tridimensionale dell'abitacolo. | 83 |
| 6.3 | Risposte all'impulso misurata e simulata. | 85 |
| 6.4 | Spettri delle risposte all'impulso misurata e simulata. | 86 |

| | | |
|------|--|-----|
| 6.5 | Facciata della chiesa di San Vitale in Parma. | 87 |
| 6.6 | <i>Stato di fatto</i> : Pianta e sezione del modello tridimensionale. | 89 |
| 6.7 | <i>Stato di fatto</i> : vista del modello tridimensionale. | 89 |
| 6.8 | <i>Stato di progetto 1</i> : la sola camera in posizione arretrata. | 91 |
| 6.9 | <i>Stato di progetto 2</i> : la sola camera in posizione più avanzata. | 92 |
| 6.10 | <i>Stato di fatto</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 93 |
| 6.11 | <i>Stato di progetto 1</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 93 |
| 6.12 | <i>Stato di progetto 2</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 94 |
| 6.13 | <i>Stato di fatto</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 94 |
| 6.14 | <i>Stato di progetto 1</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 95 |
| 6.15 | <i>Stato di progetto 2</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 95 |
| 6.16 | <i>Stato di progetto 3</i> : camera e pannellatura a soffitto. | 96 |
| 6.17 | <i>Stato di progetto 4</i> : camera, pannellatura laterale ed a soffitto. | 97 |
| 6.18 | <i>Stato di progetto 3</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 97 |
| 6.19 | <i>Stato di progetto 4</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 98 |
| 6.20 | <i>Stato di progetto 3</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 98 |
| 6.21 | <i>Stato di progetto 4</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 99 |
| 6.22 | <i>Stato di progetto 5</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 99 |
| 6.23 | <i>Stato di progetto 5</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 100 |
| 6.24 | T_{20} ottimale per la musica d’organo a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto. | 100 |
| 6.25 | T_{20} ottimale per una sala da concerti di equivalente cubatura a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto. | 101 |
| 6.26 | T_{20} ottimale per un auditorium destinato a conferenze di equivalente cubatura a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto. | 102 |
| 6.27 | <i>Stato di progetto 4</i> : visualizzazione dell’allestimento inserito nella chiesa. | 102 |

| | |
|--|-----|
| 6.28 <i>Progetto scelto</i> : particolare del modello tridimensionale e <i>rendering</i> | 103 |
| 6.29 <i>Progetto scelto</i> : mappa del <i>Sound Pressure Level</i> (media pesata ‘A’). | 103 |
| 6.30 <i>Progetto scelto</i> : mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz). | 104 |
| 6.31 Camera d’orchestra in versione ridotta (10 pannelli). | 104 |
| 6.32 Camera d’orchestra per il <i>Teatro Regio</i> (152 pannelli). | 105 |
| A.1 Curve di ponderazione A, B e C. | 116 |

Elenco delle tavole

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Tempo di riverbero per alcune tipologie di spettacoli (fonte: [7]) | 17 |
| 5.1 | Lunghezze di <i>burst</i> adottate in <i>getIR</i> | 71 |
| 6.1 | T_{20} (s): confronto tra stato di fatto e gli stati di progetto elaborati | 98 |
| 6.2 | Valori di T_{20} (s) relativi al progetto scelto. | 100 |

Capitolo 1

Premessa

Il presente lavoro di tesi è nato da un tipico problema di progettazione acustica: un ambiente esistente viene scelto come luogo per lo svolgimento di concerti di un particolare genere musicale, ma le caratteristiche acustiche non sono ideali allo scopo; si rende pertanto necessario un intervento volto a migliorarne le prestazioni, tenendo presente che la destinazione concertistica non è esclusiva, inoltre il luogo in questione, oltre a possedere un intrinseco valore architettonico, conserva una notevole raccolta di opere d'arte che il progetto dovrà necessariamente rispettare.

Successivamente la strada si è biforcata, poiché allo studio di casi concreti di progettazione si è affiancato quello, altrettanto affascinante, degli strumenti di progettazione ed in particolare di quelli che consentono di “ascoltare” un ambiente prima che vi vengano collocati gli allestimenti o prima che esso venga costruito: è sufficiente poterne simulare il comportamento acustico mediante appositi software.

Di seguito, in sintesi, il contenuto:

Capitolo 2 richiami teorici sull’acustica architettonica, descrizione dei principali parametri oggettivi ed un cenno all’*Acoustic Quality Test*, adottato per studiare ambienti di piccole dimensioni.

Capitolo 3 il punto di partenza di qualsiasi progetto di correzione acustica, ossia le tecniche di misura e la determinazione dei parametri oggettivi.

Capitolo 4 pregi e limiti del modello geometrico, mutuato dall'ottica, e sua applicazione ai programmi di simulazione acustica, in particolare *Ramsete* .

Capitolo 5 il processo di auralizzazione e le tecniche di sintesi della risposta all'impulso a partire dai risultati di una simulazione, sia ad uno che a più canali.

Capitolo 6 casi reali di simulazione e progettazione acustica, in cui vengono applicate tutte le nozioni e le tecniche di cui ai capitoli precedenti.

Capitolo 2

Richiami di acustica architettonica

2.1 Introduzione

Nel presente capitolo verranno presentate le nozioni fondamentali che sovrin-tendono qualsiasi analisi acustica in ambienti chiusi: imprescindibile punto di partenza è il lavoro di Wallace Clement Sabine¹, vero capostipite dell'*acustica* così com'è oggigiorno intesa, dal quale si introdurranno le successive teorie fino alla descrizione degli strumenti di progetto, i parametri acustici oggettivi di un ambiente. La trattazione sarà sintetica, data la vastità della materia, ma, ci si augura, ugualmente esaustiva.²

2.2 La propagazione del suono negli spazi chiusi

Il comportamento acustico di uno spazio chiuso è usualmente descritto impiegan-do tre metodi, per svariati aspetti complementari fra loro e, per questa ragione, sovente utilizzati contemporaneamente. Essi sono:

Teoria delle onde o *teoria modale*, basata sulla soluzione dell'equazione delle onde, è il sistema più corretto da un punto di vista fisico. Per contro è

¹I lavori originali si trovano in [9].

²Utili approfondimenti a tal proposito sono reperibili in[8].

difficilmente applicabile a casi concreti per via della complessità geometrica degli ambienti.

Metodo geometrico secondo il quale si effettua una semplificazione della realtà, rappresentando le onde acustiche mediante raggi, originati da una sorgente, tali da propagarsi nell'ambiente riflettendosi sulle superfici secondo le leggi dell'ottica. È il sistema impiegato nei software di previsione acustica e verrà trattato al capitolo 4.

Teoria statistica fondata sull'ipotesi di campo acustico perfettamente *diffuso*, ossia omogeneo in tutto l'ambiente, per via della distribuzione assolutamente casuale delle direzioni di propagazione delle onde che lo originano. Esso sarà dunque descritto dai valori medi delle grandezze caratteristiche. Con questo metodo è possibile, per esempio, descrivere efficacemente il fenomeno della *riverberazione*.

2.2.1 La teoria modale

Si consideri uno spazio di forma parallelepipedo (figura 2.1) di dimensioni l_x , l_y ed l_z , tale da avere superfici di materiale omogeneo e perfettamente rigide; se ora vi si inserisce una sorgente generante onde sonore, esse si propagheranno con velocità c obbedendo alla legge³:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

se, però, la sorgente segue una legge armonica ($p \propto \sin \omega t$), la 2.1 diventa

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0, \quad (2.2)$$

dove $\omega = k/c$ con k numero d'onda.

Esprimendo, quindi, la pressione acustica p come prodotto di tre componenti, p_x , p_y e p_z , dipendenti solo dalle rispettive coordinate, la 2.2 può essere separata in tre equazioni distinte:

³Nell'appendice A.1 è riportata una sintetica derivazione dell'equazione di propagazione delle onde sonore.

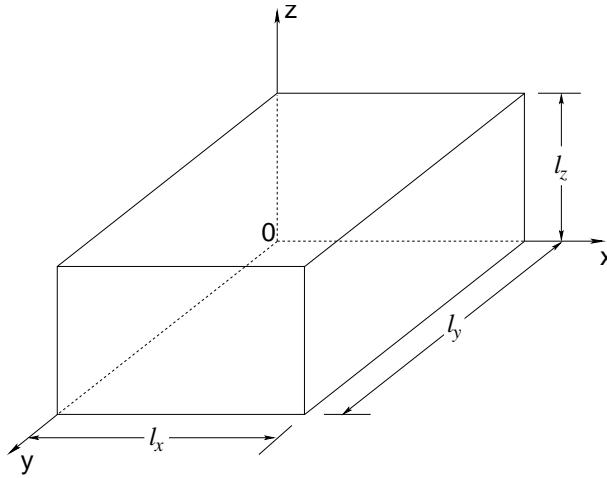


Figura 2.1: Modello di ambiente a parallelepipedo di dimensioni l_x , l_y e l_z .

$$\frac{d^2 p_x}{dx^2} = -k_x^2 p_x, \quad \frac{d^2 p_y}{dy^2} = -k_y^2 p_y, \quad \frac{d^2 p_z}{dz^2} = -k_z^2 p_z, \quad (2.3)$$

con

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (2.4)$$

Risolvendo le equazioni 2.3 si ottiene

$$p_x = A_1 \cos(k_x x), \quad p_y = A_2 \cos(k_y y), \quad p_z = A_3 \cos(k_z z) \quad (2.5)$$

nelle quali A_1 , A_2 ed A_3 rappresentano le ampiezze delle tre componenti. L'ipotesi di superfici perfettamente rigide, quindi totalmente riflettenti⁴, implica ora che le velocità di particella associate alle onde siano nulle su tali superfici, da cui le condizioni

$$\cos(k_x x) = 0, \quad \cos(k_y y) = 0, \quad \cos(k_z z) = 0, \quad (2.6)$$

soddisfatte quando

$$k_x = \frac{\pi n_x}{l_x}, \quad k_y = \frac{\pi n_y}{l_y}, \quad k_z = \frac{\pi n_z}{l_z}, \quad (2.7)$$

⁴In termini di impedenza acustica specifica ciò equivale a porre $|Z_x| = |Z_y| = |Z_z| = 0$. Si veda l'appendice A.2 per la definizione di impedenza acustica.

dove n_x , n_y ed n_z sono numeri interi positivi.

Sostituendo le 2.7 nella 2.4 si ricava l'equazione

$$f_N = \frac{kc}{2\pi} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z} \right)^2 \right] \quad (2.8)$$

in cui l'indice N si riferisce alla terna n_x , n_y , n_z . La relazione 2.8 è di particolare importanza poiché definisce le cosiddette *autofrequenze*, o *frequenze dei modi propri normali* dello spazio parallelepipedo in esame; ciascun modo proprio identifica un'onda stazionaria che può instaurarsi nell'ambiente a causa delle sue dimensioni e proporzioni.

Il numero complessivo di modi caratteristici di uno spazio può essere elevato: essi vengono abitualmente classificati in tre tipologie, assiali, tangenziali ed obliqui, a seconda della direzione di propagazione dell'onda associata, per ognuna delle quali vi sono

$$N_A \approx 2L \frac{f}{c}, \quad (2.9)$$

$$N_T \approx \frac{\pi}{2} S \left(\frac{f}{c} \right)^2 - 2L \frac{f}{c} \quad (2.10)$$

e

$$N_O \approx \frac{4\pi}{3} V \left(\frac{f}{c} \right)^3 - \frac{\pi}{4} S \left(\frac{f}{c} \right)^2 - \frac{L}{8} \frac{f}{c} \quad (2.11)$$

modi, tutti aventi frequenza compresa tra 0 ed f .⁵ Differenziando la somma delle 2.9, 2.10 e 2.11 si ricava la *densità di modi normali* per unità di frequenza, intorno alla frequenza f , esprimibile in forma ragionevolmente approssimata con

$$\frac{dN_f}{df} \approx 4\pi V \frac{f^2}{c^3}. \quad (2.12)$$

Da quest'ultima relazione derivano due importanti osservazioni:

⁵Nelle 2.9, 2.10 e 2.11 si sono posti

$$\begin{aligned} L &= 4(l_x + l_y + l_z) \\ S &= 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z) \\ V &= l_x l_y l_z \end{aligned}$$

1. la densità dei modi normali di un ambiente cresce col suo volume
2. tale densità, a parità di volume, aumenta col quadrato della frequenza.

A questo punto sarà lecito domandarsi: cosa accade se nell'ambiente di cui finora si sono studiate le autofrequenze, viene effettivamente introdotta una sorgente acustica tale da produrre un suono con frequenza uguale ad uno dei modi normali? Portandosi da una situazione ideale ad un'altra più simile ad un caso concreto, diventa necessario scartare l'ipotesi di pareti completamente riflettenti e considerarne, quindi, l'assorbimento acustico: nelle intenzioni dell'analisi modale lo si può fare associando a ciascun modo una *costante di smorzamento*⁶. Se la sorgente genera un suono di livello costante, nell'ambiente si innescherà un fenomeno di risonanza, per il quale la pressione sonora crescerà progressivamente fino ad un valore determinato proprio dal coefficiente di smorzamento. Il valore efficace medio relativo al modo n si può così esprimere

$$p_n = \frac{A_n}{\delta_n} \quad (2.13)$$

dove A_n dipende, evidentemente, dalla pressione generata dalla sorgente. Il fatto che l'ambiente presenti fenomeni di assorbimento causa, inoltre, l'eccitazione di altri modi propri, sicché ogni autofrequenza sarà più propriamente caratterizzata da una *curva di risonanza*, il cui massimo è dato dalla 2.13.

Dunque, fatta eccezione per ambienti di piccolo volume e scarso assorbimento acustico, anche disponendo di una sorgente che emetta una sola frequenza, è impossibile eccitare una unica risonanza isolata: la risposta dell'ambiente è sempre dovuta alla somma di più modi d'oscillazione.

In generale, si può dire che la pressione dovuta ad una sorgente sonora stazionaria è, in un generico punto dello spazio, esprimibile come somma di svariati termini, ognuno dei quali caratterizzato da una curva di risonanza e da ampiezza e fase casuali; la distribuzione di queste ultime, però, non può più essere ritenuta casuale per frequenze inferiori ad un valore limite, detto *Frequenza di Schroeder*:

$$f_l \cong \frac{5000}{\sqrt{V\delta}} \quad [\text{Hz}], \quad (2.14)$$

⁶Dimensionalmente: s^{-1} .

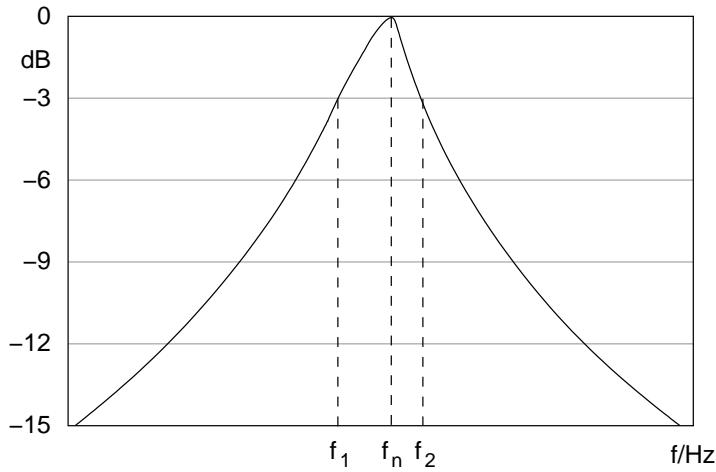


Figura 2.2: Curva di risonanza di un modo normale di frequenza f_n .

dove $\bar{\delta}$ è il valor medio delle costanti di smorzamento relative a varî modi. Se la sorgente cessa repentinamente di emettere suono, la pressione sonora decrescerà in ogni punto dell’ambiente con legge esponenziale⁷ e così la densità di energia, secondo la legge

$$D(t) = D_0 e^{-2\bar{\delta}t} \quad (2.15)$$

in cui D_0 è il valore “a regime”. Definendo allora la grandezza *tempo di riverbero* come il tempo necessario affinché la densità di energia, o la pressione sonora, decada di un milione di volte dal valore a regime o 60 dB riferendosi ai rispettivi livelli⁸, si avrà, ragionando direttamente in termini di questi ultimi,

$$-60 = 10 \log \frac{D(T_R)}{D_0} = 10 \log \left(e^{-2\bar{\delta}T_R} \right), \quad (2.16)$$

pertanto

$$T_R = \frac{6.9}{\bar{\delta}}. \quad (2.17)$$

Impiegando la definizione 2.17 si può ora riscrivere la 2.14 nel modo seguente:

⁷Macroscopicamente tale andamento si ritene esponenziale, nel dettaglio, però, vi sono numerose irregolarità dovute all’interazione tra i modi. Tali irregolarità tendono a ridursi quando il numero di modi con costante di smorzamento simile aumenta.

⁸Le definizioni dei livelli sono riportate in appendice A.4.

$$f_l \cong 2000 \sqrt{\frac{T_R}{V}} \quad [\text{Hz}]. \quad (2.18)$$

La frequenza f_l può altresì essere ritenuto il limite oltre il quale è più conveniente passare da una descrizione del campo acustico di tipo deterministico ad una di tipo statistico, per via della straordinaria complessità che un'analisi di tipo modale comporterebbe e, soprattutto, dell'assenza di ulteriori informazioni ricavabili rispetto ad un'analisi statistica.

2.2.2 La teoria statistica

Quando il numero di onde presenti nell'ambiente cresce in modo cospicuo diventa scarsamente rilevante caratterizzare da un punto di vista fisico ciascuna di esse, conviene senza alcun dubbio considerarne i valori medi. Tuttavia la sola presenza di un elevato numero di onde non è un'ipotesi sufficiente per garantire che le approssimazioni effettuate tramite un approccio statistico siano accettabili; lo diventa quando il campo acustico può definirsi *perfettamente diffuso*, ossia quando tutte le direzioni di propagazione e tutte le relazioni di fase sono equiprobabili. Quest'ultima, naturalmente, è una situazione limite, ben raggiunta solo in ambienti appositamente concepiti, detti *camere riverberanti*; se però le irregolarità delle superfici e delle geometrie⁹ garantiscono una propagazione delle onde sufficientemente casuale, allora l'applicazione della teoria statistica diventa possibile ed i risultati prodotti saranno attendibili.

Ai fini della comprensione si può vantaggiosamente supporre un comportamento del campo acustico del tutto simile a quello ipotizzato nel metodo geometrico¹⁰, quindi come un infinito numero di raggi incoerenti propagantis in tutte le direzioni possibili, ad ognuno dei quali è associata una frazione e_0 dell'energia

⁹A titolo d'esempio le forme che meno garantiscono propagazioni casuali sono senz'altro quelle circolari od ellittiche, a causa del fenomeno detto, con denominazione mutuata dall'ottica, di *focalizzazione*: un massimo dell'energia si avrà sempre nel centro della circonferenza o nei fuochi dell'ellisse. Una situazione in cui è stato chiaramente rilevato tale comportamento è citata al paragrafo 6.2.2.

¹⁰Vedi capitolo 4.

prodotta dalla sorgente. Ogni raggio, allora, porterà il seguente contributo alla densità di energia complessiva

$$D_{R_0} = \frac{e_0}{V} \quad (2.19)$$

con V volume dell'ambiente in questione, pertanto la frazione di energia sarà data da

$$I_{R0} = \bar{n} \frac{e_0}{S}, \quad (2.20)$$

dove S è l'area totale delle superfici interne, mentre \bar{n} è il numero medio di riflessioni al secondo. Quest'ultimo valore, detto anche *frequenza media di riflessione o di collisione*, è espresso dalla relazione

$$\bar{n} = \frac{cS}{4V} \quad (2.21)$$

dalla quale si ricava il *cammino libero medio* delle onde:

$$\bar{l} = \frac{c}{\bar{n}} = \frac{4V}{S}, \quad (2.22)$$

ossia la lunghezza del percorso medio tra una riflessione e la successiva. È già stato accennato nel paragrafo 2.2.1 all'importante parametro relativo alle superfici detto *coefficiente di assorbimento*, se ne ribadisce qui il concetto: quando un'onda sonora impatta contro una superficie essa viene riflessa cedendo parte dell'energia posseduta alla superficie stessa.¹¹ Il coefficiente di assorbimento α quantifica proprio la frazione di energia perduta dall'onda; tale valore, però, non è costante, ma dipende dall'angolo di incidenza dell'onda, per questa ragione ai fini dell'analisi statistica se ne impiega un valor medio, dato, ad esempio, dalla *formula di Paris*:

$$\alpha_{st} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin(2\theta) d\theta \quad (2.23)$$

in cui θ è l'angolo di incidenza. Inoltre è estremamente raro occuparsi di ambienti le cui superfici siano tali da avere tutte il medesimo coefficiente α , motivo

¹¹In realtà, come verrà meglio descritto nel paragrafo 4.1.1 la parete assorbe solo una parte di quest'energia perduta dall'onda, convertendola in calore, la parte rimanente si trasmette al locale adiacente.

per il quale si effettua, di norma, un ulteriore operazione di media. Se α_i e S_i sono rispettivamente coefficiente di assorbimento ed area della superficie i-esima, allora il coefficiente di assorbimento acustico medio dell'ambiente è espresso da

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i \alpha_i S_i \quad (2.24)$$

dove la grandezza $A = \sum_i \alpha_i S_i$ è anche detta *area di assorbimento acustico equivalente*.

Volendo, a questo punto, ricavare un'espressione per il tempo di riverbero, così come si è fatto per la teoria modale, bisognerà dapprima studiare il decadimento dell'energia in seguito all'arresto di una sorgente sonora stazionaria. L'energia sottratta dalle superfici nell'unità di tempo è pari a

$$E_a = \frac{Dc}{4} A, \quad (2.25)$$

dove A è l'area di assorbimento acustico equivalente, da cui l'incremento di energia nell'ambiente, sempre per unità di tempo,

$$E_r = E - E_a = E - \frac{Dc}{4} A, \quad (2.26)$$

che può ben essere espresso in termini di densità volumetrica di energia D :

$$E_r = \frac{d(DV)}{dt} = V \frac{dD}{dt}; \quad (2.27)$$

dunque l'incremento di energia dell'ambiente si otterrà combinando 2.26 e 2.27:

$$V \frac{dD}{dt} = E - D \frac{cA}{4} A. \quad (2.28)$$

Tra le ipotesi della teoria statistica, vi è quella di densità di energia costante in ogni punto in condizioni stazionarie, per cui nell'istante di tempo immediatamente precedente lo spegnimento della sorgente, tale densità varrà

$$D_0 = \frac{4E}{cA}; \quad (2.29)$$

in seguito allo spegnimento, la potenza fornita dalla sorgente si annullerà e l'andamento temporale del decadimento potrà essere calcolato integrando la 2.28 dopo aver posto $E = 0$. Si otterrà

$$D(t) = D_0 e^{-\frac{Ac}{4V}t}, \quad (2.30)$$

dalla quale, ricordando la definizione di tempo di riverbero - quindi ponendovi $D/D_0 = 10^{-6}$ e $t = T_R$ - ed esplicitando l'esponente, si ha

$$T_R = \frac{24V}{Ac \log e}. \quad (2.31)$$

Se ora nella 2.31 si va a sostituire il valore della velocità del suono $c = 343$ m/s si avrà quella legge che Sabine ricavò sperimentalmente e proprio per questo nota come *Formula di Sabine*:

$$T_R = 0.161 \frac{V}{A} \quad [\text{s}], \quad (2.32)$$

che può essere anche riscritta nel seguente modo impiegando la 2.24

$$T_R = 0.161 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \quad [\text{s}]. \quad (2.33)$$

A colpo d'occhio la formula di Sabine presenta una vistosa incongruenza: mentre per valori di $\bar{\alpha}$ prossimi a zero, il tempo di riverbero, correttamente, diverge, se ci si pone nel caso, pur ideale, di superfici perfettamente assorbenti - $\bar{\alpha} = 1$ - T_R rimane sempre diverso da zero. Inoltre una delle assunzioni effettuate presume un assorbimento di energia continuo da parte delle pareti, mentre la definizione di cammino libero medio e, conseguentemente, di un *tempo di volo medio* pari a $t_m = \bar{l}/c$, suggerisce una discontinuità del fenomeno: statisticamente è lecito supporre che le superfici assorbano energia ogni t_m secondi. Queste due osservazioni sono alla base della formulazione di Norris-Eyring¹²:

$$T_R = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad [\text{s}]. \quad (2.34)$$

Altra formula, concettualmente simile alla 2.34, ma con la differenza che alla media dei coefficienti di assorbimento viene sostituita quella dei *coefficienti di riflessione* $1 - \alpha$, è quella di Millington e Sette:

¹²R.F.Norris e C.F.Eyring hanno derivato la medesima legge per vie indipendenti.

$$T_R = 0.161 \frac{V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad [\text{s}], \quad (2.35)$$

la quale, però, conduce a risultati errati qualora vi sia anche una sola superficie con $\alpha_i = 1$, in questo caso infatti T_R diverge sempre.

Nelle formulazioni finora riportate è sempre stato trascurato un fenomeno fisico: l'assorbimento da parte dell'aria. Effettivamente questo è di norma minimo, soprattutto quando confrontato con quello delle superfici; in ambienti grandi, però, dove le onde sonore compiono percorsi mediamente lunghi, esso non è più irrilevante, in particolare per frequenze superiori ad 1 kHz. Introducendo la *costante di attenuazione del suono in aria* m^{13} , l'espressione 2.30 diventa

$$D(t) = D_0 e^{-(\frac{A}{4V} + m)ct}, \quad (2.36)$$

e, conseguentemente, la 2.32

$$T_R = 0.161 \frac{V}{A + 4mV} \quad [\text{s}]. \quad (2.37)$$

Merita opportuna riflessione anche l'ipotesi di densità di energia costante in tutto lo spazio: ciò risulta vero qualora ci si allontani a sufficienza dalla sorgente, viceversa, nelle immediate vicinanze di quest'ultima il contributo energetico E_D delle onde dirette - quelle, cioè, che non hanno ancora colliso con le pareti - non è confrontabile con quello del campo riverberato E_R ed è pertanto necessario distinguerli se si desidera arricchire l'accuratezza dell'analisi. In generale si avrà

$$E = E_D + E_R, \quad (2.38)$$

ma, d'altra parte, poiché la sorgente è stazionaria, l'energia che contribuisce al campo diretto nell'unità di tempo è uguale a quella assorbita dalle pareti nel medesimo intervallo temporale, dunque

$$E_D = E\bar{\alpha}, \quad (2.39)$$

mentre l'energia del campo riverberato sarà

¹³Dimensionalmente: m^{-1} .

$$E_R = E(1 - \bar{\alpha}) = D_R V \bar{n} \bar{\alpha}. \quad (2.40)$$

La relazione 2.40 costituisce un vero e proprio bilancio tra l'energia sottratta dall'ambiente e quella immessa dalla sorgente in un secondo; da essa, esplicitando \bar{n} (equazione 2.21), si ha

$$D_R = \frac{4E(1 - \bar{\alpha})}{cS\bar{\alpha}}. \quad (2.41)$$

Definendo quindi la *costante d'ambiente R*

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (2.42)$$

si perviene, infine, ad un'espressione più sintetica della 2.41

$$D_R = \frac{4E}{cR}. \quad (2.43)$$

Per quanto riguarda il campo diretto, supponendo la sorgente puntiforme e perfettamente omnidirezionale, si ha

$$D_D = \frac{E}{4\pi r^2 c}. \quad (2.44)$$

Sommando, quindi, 2.44 e 2.43 secondo la 2.38¹⁴ si ottiene

$$D = \frac{4}{c} \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right); \quad (2.45)$$

volendo, invece, passare al livello di pressione sonora¹⁵:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad [\text{dB}]. \quad (2.46)$$

¹⁴Quest'equazione contiene le energie, il passaggio alle grandezze densità di energia, però, è immediato.

¹⁵Se p_{rms} è il valore efficace della pressione sonora, si ricorda che

$$D = \frac{p_{\text{rms}}^2}{\rho_0 c^2}$$

quindi la 2.45 diventa

$$p_{\text{rms}}^2 = W \rho_0 c \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right).$$

da cui l'espressione del livello.

La distanza cui i livelli di pressione sonora del campo diretto e riverberato si equivalgono è detta *distanza critica*, oppure *raggio di riverberazione*, e la si ottiene eguagliando i termini fra parentesi della 2.46:

$$r_h = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad [\text{m}]. \quad (2.47)$$

Sostituendovi, poi, la formula di Sabine si ha un'espressione alternativa, più frequentemente adottata

$$r_h = 0.1 \sqrt{\frac{V}{\pi T_R}} \quad [\text{m}]. \quad (2.48)$$

2.3 Descrittori acustici oggettivi

La trattazione finora riportata era riferita a generiche questioni teoriche, ora si vuole cominciare ad affrontare in modo più specifico il problema della caratterizzazione di sale da concerto, teatri ed auditorium, quindi di un aspetto fondamentale della progettazione delle stesse; è, però, d'obbligo premettere che qualsiasi discussione riguardo l'analisi e, conseguentemente, il tentativo di migliorare la qualità della percezione acustica in simili ambienti, dovrà necessariamente ricondursi a considerazioni di carattere psicoacustico: se è vero che ogni segnale acustico è, come già detto, sostanzialmente divisibile in due parti, il *suono diretto* e la *coda riverberante*, sarà la conoscenza di come il cervello umano correla fra loro queste due componenti a guidare un progetto acustico verso soluzioni efficaci e, nel caso, realmente migliorative di una situazione già in opera.

Si pensi, per esempio, all'energia contenuta nel campo riverberante: quando eccessiva può costituire un elemento di grande disturbo all'ascolto, rendendolo caotico e privando il messaggio di intelligibilità; quando troppo esigua, al limite del caso di ambiente anecoico, si possono venire a creare situazioni di reale disagio acustico. Se, però, la si riesce a “modellare” e distribuire lungo la curva di decadimento in modo opportuno, ecco che essa può rinforzare un'onda diretta altrimenti debole, oppure rendere la sala acusticamente più “calda”¹⁶ e confortevole.

¹⁶Parlando di sensazioni uditive è normale, spesso necessario utilizzare termini descrittivi non propriamente tecnici: ciò che conta è riuscire a tradurne il significato in un parametro di progetto.

Tuttavia una sala da concerti non è unicamente occupata da ascoltatori, vi si trovano anche i musicisti ed in generale il comportamento acustico dell'ambiente gradito ai primi non è sempre altrettanto piacevole per questi ultimi. Uno strumentista, infatti, soprattutto nella musica d'insieme ha la necessità di ascoltare con il massimo nitore il suono prodotto dal proprio strumento così come quello prodotto dagli altri, questo ai fini di ottenere una sonorità complessiva omogenea e di sincronizzare gli attacchi: tecnicamente, ciò si traduce in un segnale caratterizzato prevalentemente dal campo diretto, senza particolari colorazioni dello spettro. Un risultato decisamente troppo "secco" per uno spettatore, che invece, di norma, ama essere "avvolto" da una più o meno contenuta coda riverberante.

Queste prime osservazioni possono dare l'idea di quanto sia delicato il problema della progettazione acustica di una sala, a ciò si aggiungano la richiesta di "prestazioni" acustiche sempre più specifiche di teatri, sale da concerto ed auditorium e gli investimenti, talora ingenti, che simili realizzazioni comportano: logica conseguenza è la necessità di parametri di qualità del campo sonoro in ambiente chiuso che siano

- misurabili sperimentalmente,
- riconosciuti ed utilizzati in modo diffuso,
- correlabili a sensazioni uditive non esprimibili come risultato di una misura strumentale tradizionale.¹⁷

Tale necessità, però, ha fatto sì che, nel corso degli anni, il numero di tali parametri sia diventato particolarmente rilevante, per le ragioni più varie. Se ne riporteranno, quindi, nel seguito soltanto i principali.

2.3.1 Il tempo di riverbero

Come già accennato al paragrafo 2.2.2, il primo parametro acustico ambientale misurato fu il tempo di riverbero, ad opera di Sabine, al termine del secolo XIX, e tuttora è il dato che riveste la maggior importanza nell'analisi e nel progetto

¹⁷Quali il livello sonoro, lo spettro, ecc.

| <i>Destinazione sala</i> | <i>T_R</i> di riferimento (s) |
|--------------------------|---|
| Prosa | 0.4 ÷ 1 |
| Musica da camera | 1.4 ÷ 2 |
| Musica sinfonica | 1.7 ÷ 2.3 |
| Opera lirica | 1.2 ÷ 1.8 |
| Musica sacra | 2 ÷ 4 |

Tabella 2.1: Tempo di riverbero per alcune tipologie di spettacoli (fonte: [7]).

acustico di una sala.

Un basso tempo di riverbero¹⁸ (1 secondo o meno) caratterizzerà sale acusticamente “asciutte”, al contrario valori elevati (oltre 3–4 secondi) sono tipici di ambienti in cui ogni suono sarà seguito da un più o meno lungo “alone” sonoro, per esempio le chiese. Evidentemente, nel primo caso un’esecuzione musicale potrà risultare particolarmente intellegibile da un punto di vista della risoluzione temporale dei suoni prodotti dagli strumenti, anche quando questi si presentano in rapida successione; nel secondo caso, invece, questo non potrà avvenire, d’altra parte, però, gli ambienti molto riverberanti spesso donano un “calore” particolare al messaggio musicale. Qual’è, allora, il valore ideale del tempo di riverbero? La risposta è prevedibile: non c’è. Per una nutrita schiera di ragioni. In *primis* il genere di evento cui è destinato l’ambiente: auditorium per conferenze, teatro di prosa, sala da concerti presentano ognuno richieste acustiche sostanzialmente differenti, nell’ultimo caso, inoltre, a seconda del tipo di musica che si desidera far eseguire, l’intervallo di valori del tempo di riverbero considerati ottimi cambia ancora. In tabella 2.1 è riportato, a titolo d’esempio, un elenco di eventi di vario genere ed l’intervallo di valori di T_R ritenuti migliori; ci si può immediatamente rendere conto delle complessità progettuali cui si faceva riferimento al paragrafo precedente. Non solo: anche la cubatura del locale influenza la qualità della percezione e costituisce, dunque, un ulteriore parametro in base al quale varia il valore migliore di T_R ; esempio di tale variabilità è visibile in figura 2.3, nella quale sono state tracciate curve sperimentali del tempo di riverbero a 500 Hz in funzione del volume dell’ambiente.

¹⁸La cui definizione è stata data al paragrafo 2.2.1.

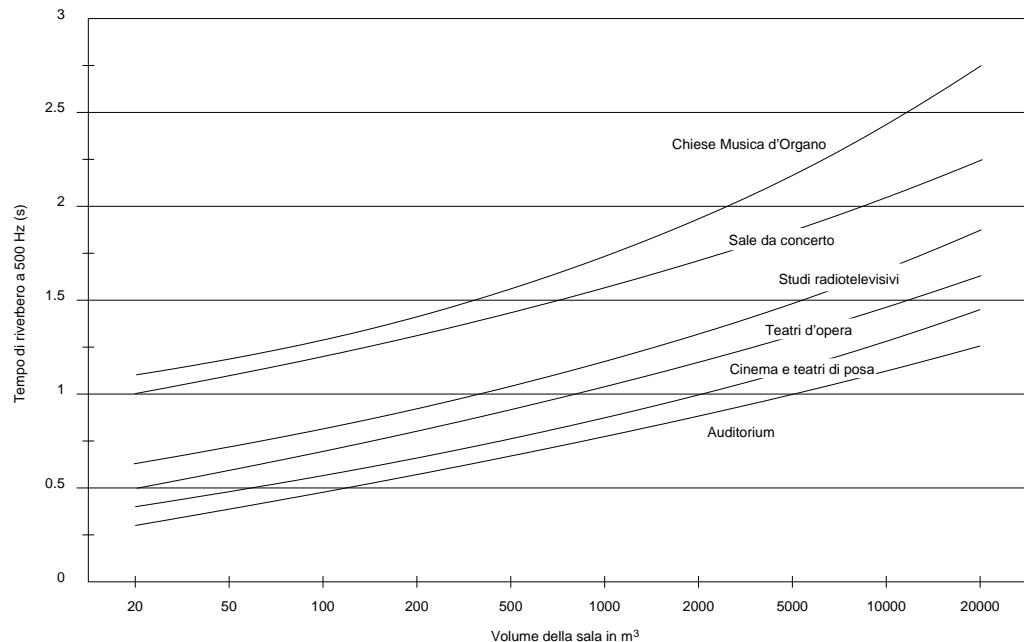


Figura 2.3: Tempo di riverbero in funzione del volume per alcune tipologie di ambienti.

Da un punto di vista psicoacustico, però, studi di settore hanno mostrato come, ai fini dell’ascolto, la parte realmente utile dell’intero decadimento sia, in media, soltanto la prima; quantitativamente la si può racchiudere in qualche decina di millisecondi dall’onda diretta. Per ritardi superiori - 100 ms ed oltre - la coda riverberante assume sempre più la caratteristica di disturbo. In altre parole si può affermare che la frazione di energia compresa in questi primi istanti di tempo rafforza *percettivamente*¹⁹ l’onda diretta. Per queste ragioni sono state proposte formulazioni alternative del tempo di riverbero che privilegiassero i primi istanti del decadimento rispetto alla coda, ad esempio l’*EDT* (*Early Decay Time*), proposto da Jordan; tale tempo di riverberazione si calcola interpolando i primi 10 dB del tracciato di decadimento con una retta e misurando il tempo corrispondente ad un decremento di 60 dB dal valore di regime lungo tale retta. Una tecnica simile viene adottata per determinare il tempo di riverberazione

¹⁹Si desidera insistere sul fatto che questo non è un fenomeno fisico, ma un comportamento dell’orecchio - leggi cervello - umano, che funziona come una sorta di “integratore” nel tempo.

classico T_R ²⁰, tuttavia esso difficilmente viene scelto in sede di misura per via della presenza del rumore di fondo, il cui livello, sovrapposto al suono prodotto dalla sorgente, può portare a valutazioni errate dell'istante in cui il livello del decadimento si è portato a 60 dB dal valore di regime. Si preferisce ricorrere ai tempi di riverbero denominati T_{20} o T_{30} , per determinare i quali si usa una retta interpolante passante per i punti del tracciato corrispondenti a -5 dB e, rispettivamente, -25 dB o -35 dB rispetto al livello di regime.

Di norma, sia T_R che EDT sono misurati in funzione della frequenza in almeno sei delle dieci bande d'ottava normalizzate²¹, quelle con frequenze di centrobanda da 125 Hz a 4 kHz.

2.3.2 Indici di definizione e chiarezza

Nel paragrafo precedente è stata introdotta l'importanza, da un punto di vista percettivo, dei primi istanti del decadimento: gli indici di definizione, chiarezza ed il tempo baricentrico sono stati elaborati proprio per restituire all'analista ed al progettista una misura di quanta energia sia effettivamente contenuta in quegli istanti. Tale dato è poi immediatamente correlabile con la possibilità da parte del cervello di decodificare correttamente l'informazione contenuta nel segnale sonoro; a questo proposito, però, ancora una volta è necessario specificare quale sia il messaggio, infatti la ricerca ha mostrato che l'energia utile per la chiarezza del parlato dev'essere contenuta in 50 ms dall'onda diretta, mentre per la musica tale intervallo va allungato fino ad 80 ms. Thiele, nel 1953, basandosi sugli studi di Haas del 1951 ha quindi proposto un primo indice detto di *Definizione* (*Deutlichkeit*) così definito:

$$D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}; \quad (2.49)$$

per quanto riguarda la musica, il favore maggiore è stato ricevuto dall'indice di *chiarezza* (*Klarheitsmass*), la cui definizione è, invece,

²⁰Indicato anche con T_{60} .

²¹I filtri in bande d'ottava sono definiti nella norma IEC 1260:1995, oppure IEC-EN 61260:1996.

$$C_{80} = \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^\infty p^2(t) dt}, \quad (2.50)$$

del quale, peraltro, esiste una versione anche per il parlato indicata con C_{50} ed ottenibile dalla 2.50 semplicemente sostituendo il limite d'integrazione di 80 ms con quello di 50 ms, sia al numeratore che al denominatore. Il parametro C_{80} , introdotto dalla Scuola di Dresda negli anni '70, è in grado, secondo gli autori, di tener conto degli attributi di *Trasparenza temporale* e *Trasparenza armonica*, ossia della possibilità di distinguere suoni sia in successione che in sovrapposizione. I parametri finora riportati, come si evince dalle definizioni, sono rapporti energetici ed in quanto tali suscettibili al problema dato da eventuali contributi energetici notevoli situati nei pressi del limite d'integrazione: a seconda che sia prima o dopo, il risultato cambia in modo tutt'altro che trascurabile. Un tentativo di soluzione è l'*istante baricentrico* (*Schwerpunktzeit*) dell'energia, elaborato da Kurer (1969):

$$t_{bar} = \frac{\int_0^\infty tp^2(t) dt}{\int_0^\infty p^2(t) dt}, \quad (2.51)$$

il cui valore risulta comunque fortemente correlato con quello degli indici di cui sopra.

2.3.3 L'indice di robustezza

A differenza di ciò che avviene all'aperto, l'intensità percepita (*Loudness*) di un segnale sonoro prodotto in un ambiente chiuso può essere aumentata dallo stesso. Un'indicazione di quanto le pareti, l'arredamento, ecc. rinforzino tale intensità è data dall'indice di *robustezza* del suono (*Sound strength*), definito nella norma ISO 3382 nel seguente modo:

$$G = 10 \log \frac{\int_0^\infty p^2(t) dt}{\int_0^\infty p_{10}^2(t) dt} \quad [\text{dB}], \quad (2.52)$$

dove $p(t)$ è la risposta all'impulso per una coppia sorgente/ricevitore nella sala e $p_{10}(t)$ la risposta che la stessa sorgente farebbe misurare alla distanza di 10 m in campo libero. Una definizione alternativa è data dalla

$$G = L_p - L_w + 31 \quad [\text{dB}], \quad (2.53)$$

in cui L_p è il livello di pressione sonora nel punto dell'ambiente considerato, misurato in dB riferiti a $20 \mu\text{Pa}$, mentre L_w è il livello di potenza sonora della sorgente omnidirezionale, misurato in dB riferiti ad 1 pW. Dalla relazione 2.53 è facilmente comprensibile il perché questo parametro sia sovente interpretato come indicatore di una sorta di effetto d'*amplificazione* della sala.

G viene misurato per le sei bande d'ottava sopra menzionate.

2.3.4 Parametri spaziali

La sensazione di *spazialità* è connessa col grado di coinvolgimento da parte dello spettatore all'evento musicale. Se la sala ha scarse caratteristiche di spazialità, all'ascoltatore parrà di assistere allo spettacolo come se fosse affacciato ad una finestra, cioè con un chiara percezione di distacco; quando, invece, il grado di spazialità è buono, chi ascolta si sente parte integrante dell'evento, non è più “affacciato ad una finestra”, ma immerso in esso.

Vi sono stati studi che hanno rivelato la comparsa di due aspetti della spazialità, correlati a ben precise sensazioni: il primo è denominato *Apparent Source Width (ASW)* ed indica la percezione acustica, completamente assente all'aperto, di una sorgente più ampia di quanto sia realmente. Essa è legata principalmente alle riflessioni laterali contenute nei primi 80 ms del diagramma di decadimento. Il secondo aspetto, invece, è detto *Listener Envelopment (LEV)* e corrisponde alla sensazione dell'ascoltatore di essere avvolto dal campo sonoro e sembra legato al campo riverberato, il cui inizio è convenzionalmente fissato ad 80 ms dall'onda diretta.

La conseguenza delle osservazioni di cui sopra è stata la definizione di indici in grado di rivelare quanto l'ambiente analizzato presenti caratteristiche acustiche di spazialità; il primo fu proposto da Jordan nel 1981, chiamato parametro di efficienza laterale (*Lateral Efficiency, LE*) e così definito:

$$LE = \frac{\int_{25\text{ms}}^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ms}} dt}, \quad (2.54)$$

dove $p_L(t)$ è il segnale all'uscita di un microfono con diagramma di direttività a figura di otto²² in risposta all'impulso emesso da una sorgente omnidirezionale posta sul palcoscenico; tale microfono va orientato in modo che punti la sorgente con una direzione a sensibilità, in teoria, nulla. $p(t)$ è invece rilevata con un microfono omnidirezionale nelle medesime condizioni ambientali precedenti. La misura viene effettuata nelle due bande d'ottava centrate rispettivamente a 500 Hz e 1 kHz.

Nell'intento di eliminare i contributi del suono diretto, la norma ISO 3382 riporta la seguente definizione del parametro frazione laterale di energia (*Lateral Fraction*), derivato ovviamente da LE ,

$$LF = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} p_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}. \quad (2.55)$$

Si riporta anche la formulazione di Barron e Marshall del 1981,

$$L_f = \frac{\sum_{t=5\text{ms}}^{80\text{ms}} r \cos \phi}{\sum_{t=0}^{80\text{ms}} r}, \quad (2.56)$$

nella quale viene introdotta un'altra utile considerazione, cioè quella di pesare l'energia sonora r associata ad ogni riflessione con il coseno dell'angolo ϕ , formato dalla direzione secondo cui la riflessione giunge all'ascoltatore - che guarda verso il suono diretto - con la retta passante per le sue membrane timpaniche. Tale peso angolare è riportato nella norma ISO 3382 secondo il metodo di misura di Kleiner:

²²Nel paragrafo 5.1.3 si potrà trovare una sintetica descrizione di questo dispositivo. Per quanto riguarda la definizione di direttività, si veda l'appendice A.3.

$$LFC = \frac{\int_{5\text{ms}}^{80\text{ms}} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}. \quad (2.57)$$

Il parametro LF definito in 2.55 viene misurato nelle bande d'ottava centrali, con frequenza di centrobanda che va da 125 Hz a 4 kHz.

La spazialità è altresì significativamente legata al coefficiente di cross-correlazione interaurale, definito nella norma ISO 3382 come

$$IACC_{t_1/t_2} = \max(|IACF_{t_1/t_2}(\tau)|) \quad \text{con} \quad -1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}, \quad (2.58)$$

nella quale $IACF_{t_1/t_2}(\tau)$ è la funzione di correlazione mutua normalizzata tra la risposta all'impulso rilevata all'ingresso dell'orecchio sinistro $p_l(t)$ e quella rilevata all'ingresso dell'orecchio destro $p_r(t)$ di una testa artificiale o di una persona che guarda la sorgente:

$$IACF_{t_1/t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_l^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_r^2(t) dt}}. \quad (2.59)$$

Generalmente si considera un intervallo di tempo pari al tempo di riverbero, dunque si pone $t_1 = 0$ e $t_2 = \infty$. Sovente è utilizzato un parametro alternativo, $1 - IACC$, il quale aumenta al crescere della mancanza di somiglianza tra i segnali relativi alle due orecchie, dunque col grado di spazialità.

È ormai abbastanza diffusamente riconosciuto che tanto LF , quanto $IACC_{0/80\text{ms}}$ di una risposta all'impulso binaurale siano entrambi descrittori dell'*ASW*.

Per quanto riguarda il *LEV*, purtroppo, a tutt'oggi non esiste un parametro che lo descriva ottimamente; le ricerche di Breadley e Souldre hanno mostrato una rilevante correlazione del *LEV* con una misura logaritmica dell'energia laterale valutata da 80 ms in poi:

$$LG_{80,\infty} = 10 \log \frac{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p_L^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} \quad [\text{dB}]. \quad (2.60)$$

I valori ottenuti sono poi stati pesati secondo la curva di ponderazione *A* e combinati sulla base della potenza. Tuttavia, al momento della scrittura di questo lavoro, non è stato ancora studiato l'effetto della distribuzione nel tempo dell'energia laterale seguente i primi 80 ms, ritenuto dagli Autori importante per ottenere un'indicazione del *LEV* di una sala reale; ne è stata comunque mostrata la dipendenza da t_{bar} e da *EDT*.

2.3.5 L'*Acoustic Quality Test*

In ambienti di dimensioni confrontabili con le lunghezze d'onda della banda audio le analisi acustiche tradizionali non sono, purtroppo, efficaci; un caso tipico è quello dell'abitacolo d'automobile, dove non è neppure possibile parlare di “tempo di riverbero”, dal momento che non vi si rileva una vera e propria coda riverberante dalle misure di risposta all'impulso. È pertanto necessario rivolgersi a metodologie alternative, i cui risultati siano maggiormente correlati con le sensazioni psicoacustiche generantesi in simili ambienti, una di queste è denominata *Acoustic Quality Test*²³ (*AQT*). Essa si compone delle seguenti fasi:

1. si produce un segnale nel dominio del tempo costituito da una sequenza di *burst*²⁴ sinusoidali con frequenza crescente in modo da coprire l'intera banda d'interesse. Ogni *burst* è lungo 200 ms e l'intervallo tra due *burst* successivi può andare dai 33 ai 66 ms²⁵;
2. dopo aver effettuato le misure di risposta all'impulso²⁶, si effettua l'operazione di convoluzione²⁷ col segnale di cui al punto precedente;
3. si calcola infine il valore RMS del segnale ottenuto dalla convoluzione adottando una costante di tempo di 25 ms.²⁸

²³Se ne può reperire un'approfondita trattazione in [3].

²⁴Con il termine *burst* si intende uno spezzone, solitamente piuttosto breve, di un segnale.

²⁵Questo intervallo dipende in larga parte dal rumore di fondo presente nell'ambiente. In effetti un segnale siffatto è stato ideato prendendo a modello brani musicali, dove effettivamente si possono trovare successioni brevi di suoni a frequenze differenti. Se, però, il rumore di fondo è troppo forte ed i suoni troppo ravvicinati nel tempo il fenomeno del mascheramento impedisce all'orecchio di risolverli.

²⁶Per la descrizione in dettaglio si rimanda al capitolo 3.

²⁷Affrontata al capitolo 5.

²⁸Si rammenta che l'orecchio umano non è sensibile ai valori istantanei della pressione, quanto

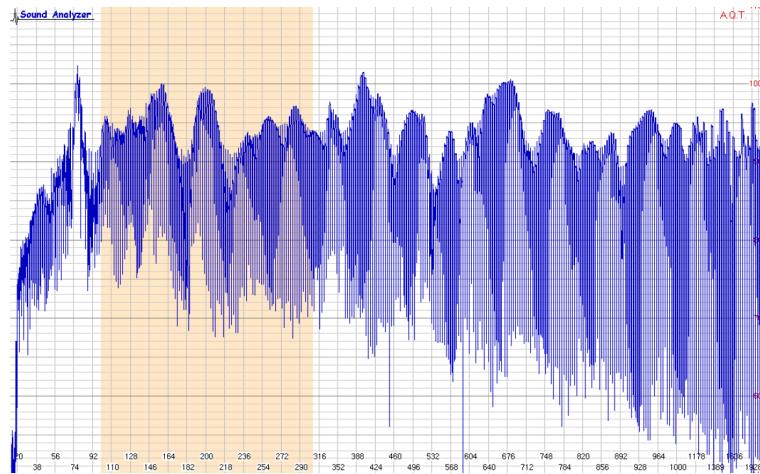


Figura 2.4: Tracciato *AQT*.

Il tracciato, nel dominio del tempo, del segnale ultimo è *de facto* il risultato dell'*AQT* e viene valutato con semplice ispezione visiva. Un esempio è riportato in figura 2.4, ma è l'analisi dei dettagli che fornisce indicazioni concrete sul comportamento del sistema sorgente-ambiente: in figura 2.5 è raffigurato un comportamento tipico, dove ogni tratto, circa, orizzontale è il valore RMS di un *burst*, caratterizzato da propri transitori di attacco (*attack*) e rilascio (*decay*). Sulla sinistra della figura 2.5 si può notare una situazione in cui il suono riflesso dall'ambiente è sostanzialmente in fase con quello prodotto dall'altoparlante, nella zona centrale, invece, essi interagiscono in modo distruttivo, poiché in evidente opposizione di fase, da cui il livello RMS inferiore.

L'*AQT* è quindi riconducibile immediatamente all'analisi modale: mettendo in evidenza eventuali fenomeni di risonanza, dovuti, appunto, ai modi di vibrazione propri dell'ambiente in esame, essa costituisce un utile strumento di analisi ai fini, per esempio, della corretta sonorizzazione dello stesso. Il tutto viene reso possibile senza ricorrere a strumenti differenti da quelli comunemente adoperati per l'analisi acustica e per l'elaborazione numerica dei segnali.

ai valori RMS: ricerche di carattere psicoacustico hanno mostrato che la costante di tempo con cui opera l'orecchio vale, in media, circa 25 ms.

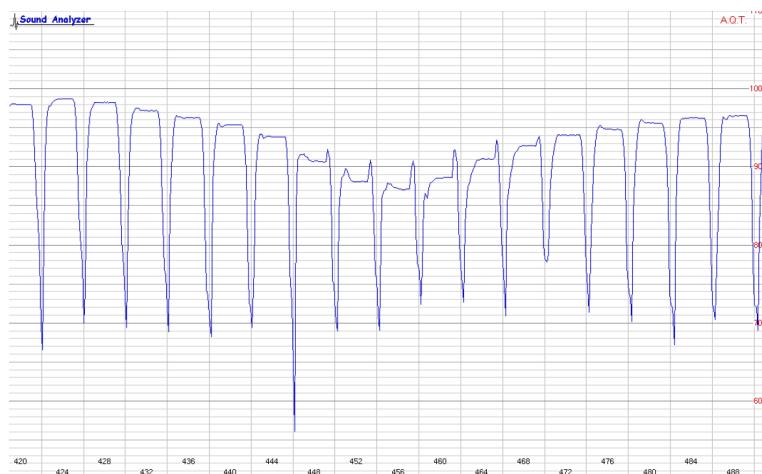


Figura 2.5: Dettaglio del tracciato *AQT* di figura 2.4.

Capitolo 3

Tecniche di misura

Nel precedente capitolo sono stati presentati i principali descrittori delle caratteristiche acustiche di una sala, ne sono state riportate le definizioni ed illustrate le informazioni ottenibili, ma non è stata descritta alcuna tecnica di calcolo. O meglio, tutti i summenzionati parametri si calcolano evidentemente a partire da una diagramma di decadimento relativo ad un particolare punto della sala, ma come ottenere quest'ultima misura? Una soluzione è certamente quella della sorgente stazionaria, tuttavia non è l'unica. Vi è un altro strumento notevolmente più potente che, oggigiorno, ha completamente soppiantato la prima tecnica: la risposta all'impulso.

Nel presente capitolo verranno quindi descritte le principali tecniche di misura della risposta all'impulso, analizzandone i principali pregi e difetti.

3.1 Le risposte all'impulso

L'ipotesi alla base dell'idea di misurare la *risposta all'impulso* di un ambiente è quella di considerare quest'ultimo come un sistema lineare tempo-invariante (LTI), caratterizzato da un ingresso ed un uscita,¹ come visibile in figura 3.1.

Tale ipotesi, apparentemente ottimistica, è in realtà quasi sempre verificata, a patto, ovviamente, di non alterare geometria, arredamento, disposizione di sorgenti e rilevatori, ecc.

¹In realtà le uscite di un simile sistema sono solitamente numerose: almeno una per ogni ascoltatore presente nella sala. L'ingresso, invece, è la sorgente cui si accennava al paragrafo 2.1.

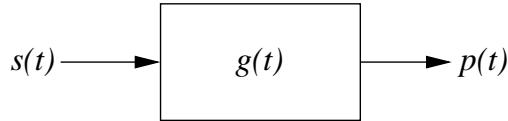


Figura 3.1: Modello di un sistema lineare tempo-invariante.

Per un sistema LTI, come noto, l'uscita $p(t)$ è determinabile calcolando il prodotto di convoluzione tra la funzione in ingresso $s(t)$ e la *funzione di trasferimento* $h(t)$

$$p(t) = \int_0^\infty s(t - \tau)h(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

o, più sinteticamente,

$$p(t) = s(t) * h(t); \quad (3.2)$$

siano ora $S(f)$ e $H(f)$ le trasformate secondo Fourier² dei segnali, rispettivamente $s(t)$ e $h(t)$, allora la trasformata di Fourier del segnale all'uscita del sistema, per il teorema della convoluzione³, è data dal semplice prodotto tra le prime due

$$P(f) = S(f) \cdot H(f). \quad (3.3)$$

La relazione 3.2 indica una possibile strada per la determinazione della funzione di trasferimento $h(t)$: se il generico segnale d'ingresso $s(t)$ viene sostituito con un impulso unitario di durata infinitesima, la cosiddetta *δ di Dirac*, all'uscita si otterrà esattamente $h(t)$. Nel dominio del tempo tale calcolo è, però, molto dispendioso: passando invece al dominio delle frequenze⁴ ed applicando la 3.3, ecco che la complessità si riduce notevolmente e la teoria dei sistemi lineari diventa conveniente anche da un punto di vista computazionale; per avere, infine,

²Per la definizione si veda l'appendice A.6.

³Secondo il quale i prodotti di convoluzione nel dominio del tempo equivalgono a prodotti semplici nel dominio della trasformata di Fourier e viceversa.

⁴La trasformata secondo Fourier di un impulso unitario è una funzione costante: vale 1 a tutte le frequenze.

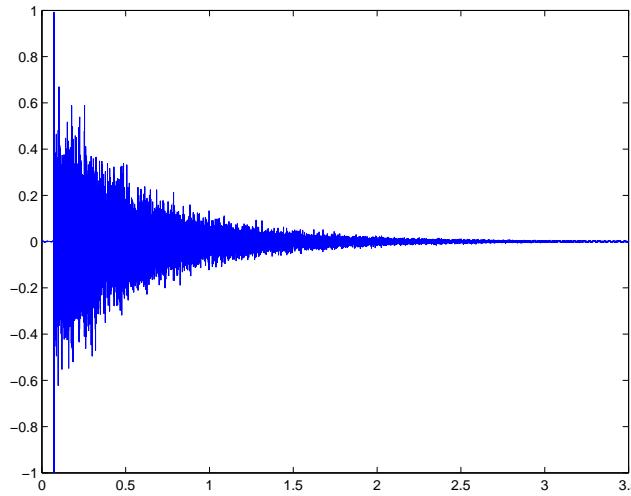


Figura 3.2: Esempio di risposta all'impulso.

un risultato nel dominio del tempo, la funzione $H(f)$ così ottenuta andrà, ovviamente, antitrasformata.

Un esempio di risposta all'impulso è visibile in figura 3.2, mentre il suo equivalente energetico - detto anche *ecogramma* - è riportato in figura 3.3: una analisi puramente visiva mostra già alcune caratteristiche della sala in esame, in particolare la distanza temporale delle prime riflessioni rispetto all'onda diretta può già dare un'indicazione quantitativa di eventuali problemi di echi legati a quel punto di ascolto.⁵

La misura diretta non è però l'unica tecnica possibile per la determinazione di una risposta all'impulso: se sono note con adeguata precisione la geometria dell'ambiente e le caratteristiche acustiche delle superfici interne ad esso, è possibile ottenere una risposta all'impulso *teorica*, per una sorgente ed un ricevitore opportunamente descritti, applicando le leggi dell'acustica. Inutile sottolineare la dubbia attendibilità di una simile serie di calcoli se effettuati a tavolino, tuttavia questa è la direzione necessariamente seguita dai progettisti di software di previsione acustica, come verrà più ampiamente discusso al capitolo 4.

⁵Si rammenta che ogni misura fornisce informazioni caratteristiche del punto particolare in cui è collocato il microfono, le quali perdono di validità via via che ci si allontana da quel punto.

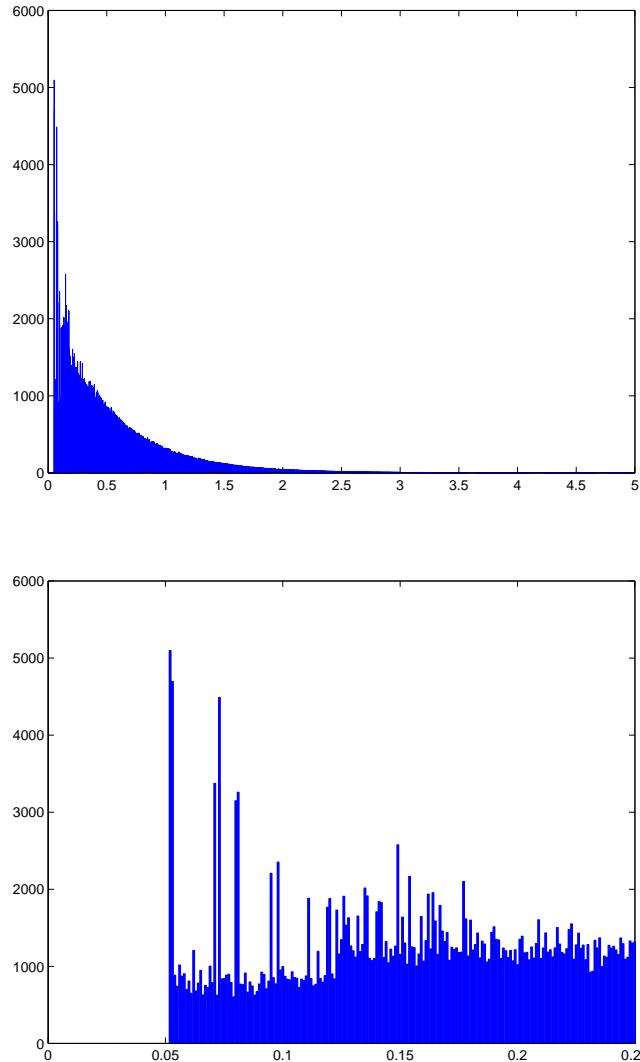


Figura 3.3: Esempio di risposta all’impulso energetica (ecogramma) e dettaglio delle prime riflessioni.

3.2 L’integrale di Schroeder

Una risposta all’impulso, così com’è, oltre alle informazioni riguardo onde dirette e riflesse di cui al paragrafo precedente, non dice granché. In particolare non da la possibilità di determinare i parametri acustici ambientali per i quali è comunque necessaria la misura del decadimento temporale. Sabine fu il primo a misurarla a scopo scientifico mediante la più intuitiva delle tecniche: una volta prodotto

campo sonoro di tipo stazionario⁶ lo interrompeva bruscamente, quindi misurava il tempo necessario affinché l'intensità del campo si portasse ad un livello di 60 dB inferiore a quello di regime. Tale tecnica costituì lo standard *de facto* per buona parte del secolo XX, fino agli studi di Schroeder, il quale trovò una forte correlazione tra il tempo di riverbero e la risposta all'impulso di un ambiente. In effetti, a partire da quest'ultima oppure anche da un ecogramma, è possibile ricostruire una curva di decadimento caratteristica di una sorgente stazionaria; questo risultato deriva da una serie di osservazioni di tipo statistico: in particolare, il decadimento del campo stazionario presenta fluttuazioni che dipendono dalla storia casuale del segnale negli istanti immediatamente precedenti lo spegnimento della sorgente. Quindi la media temporale $\overline{n^2(t)}$ di un elevato numero di misure del decadimento elevate al quadrato $n^2(t)$ si relaziona al quadrato della risposta all'impulso $h^2(t)$ tramite l'equazione:

$$\begin{aligned}\overline{n^2(t)} &= \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau = \\ &= \int_0^\infty h^2(\tau) d\tau - \int_0^t h^2(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (3.4)$$

La ricostruzione vera è propria della curva di decadimento può quindi avvenire mediante due tecniche:

- integrazione all'indietro del quadrato della risposta all'impulso (curva A in figura 3.4) fino a raggiungere il livello di energia stazionario;
- sottraendo al livello di energia stazionario precedentemente calcolato i valori progressivamente assunti dal quadrato della risposta all'impulso (procedimento “in avanti”, curva B in figura 3.4).

Se il decadimento è di tipo esponenziale, l'accordo tra la tecnica indicata da Schroeder e quella tradizionale con la sorgente stazionaria è ottimo, nei casi concreti, però, non sono infrequenti diagrammi di decadimento con pendenze multiple, talvolta concave oppure convesse.⁷ In queste ultime situazioni sono riscontrabili differenze tra i due metodi, anche se, a detta di Schroeder, i valori

⁶La sorgente impiegata da Sabine allo scopo fu una canna d'organo.

⁷Questo non deve destare meraviglia, è sufficiente pensare alla complessità architetturale e spesso ornamentale di teatri, auditorium, chiese, ecc., per giustificare simili rilevazioni.

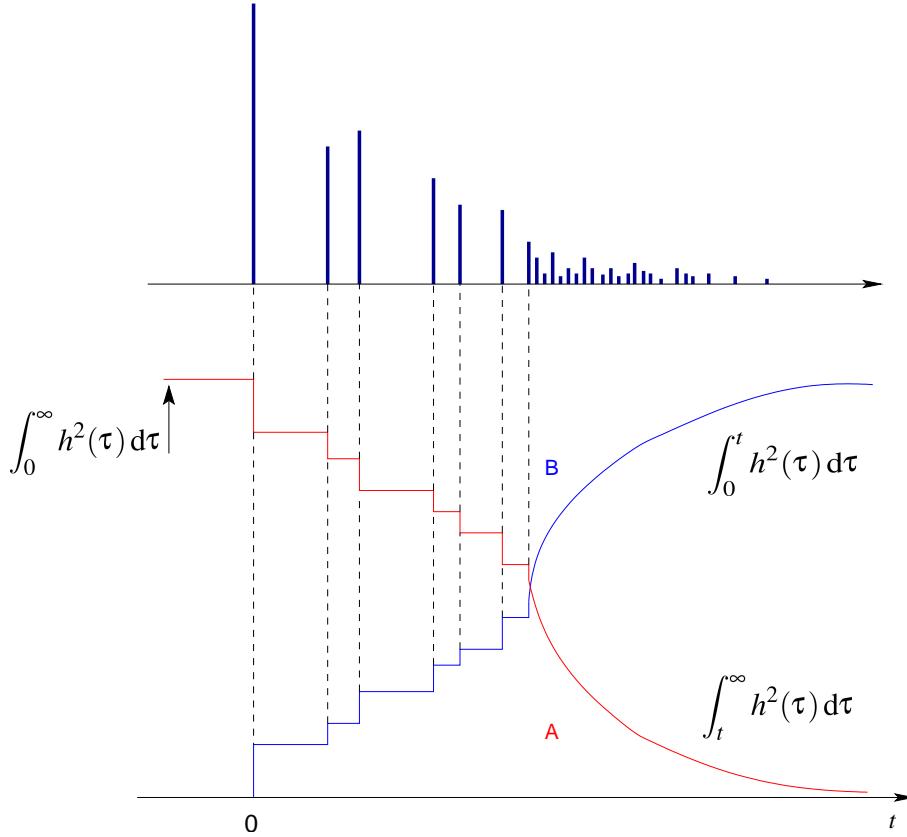


Figura 3.4: Ricostruzione della risposta all'impulso mediante integrazione di Schroeder.

ottenuti dalla risposta all'impulso integrata sono meglio correlati con la sensazione uditiva umana.

Un altro problema è dato dal rumore di fondo, integrando il quale possono presentarsi pendenze artificiose nel decadimento; oggi è, però, possibile sfruttare avanzate tecniche di filtraggio in grado di minimizzarne gli effetti, evitando così alterazioni del diagramma.⁸

⁸Si veda [8], capitolo 19. Il vero problema tuttavia non è dato dal rumore di fondo ma dalla norma ISO 3382 che disciplina le misure: osservazioni errate sul rumore e la mancanza di indicazioni precise su come evitare l'integrazione di quest'ultimo, possono limitare la precisione dei diagrammi di decadimento.

3.3 Principali metodi di misura della risposta all'impulso

Dopo aver introdotto le ipotesi che portano all'uso della risposta all'impulso come strumento di analisi ed illustrato l'ottenimento da essa di una misura di decadimento, si riporterà ora come avvenga *operativamente* la registrazione di una risposta all'impulso, seguendo quattro metodi: da quello più intuitivamente connesso alla trattazione teorica a quello oggigiorno più diffuso.

3.3.1 Misura con segnale impulsivo

Dalla, pur breve, trattazione di cui al paragrafo 3.1 è possibile dedurre, quasi d'istinto, un primo sistema per misurare una risposta all'impulso: è sufficiente porre all'ingresso del sistema una δ di Dirac ed all'uscita si avrà esattamente il segnale desiderato. Ancora una volta, però, sono i problemi pratici a frenare l'entusiasmo, in particolare la difficoltà di riprodurre mediante un altoparlante un segnale di durata trascurabile⁹ e la cui ampiezza sia almeno 60 dB maggiore del rumore di fondo. Dunque si ricorre a sorgenti alternative quali una pistola a salve o lo scoppio di un palloncino di gomma; questi segnali, d'altronde, hanno durate quantificabili in qualche decina di periodi di campionamento ed uno spettro non piatto. In particolare lo sparo di una pistola ha scarse componenti frequenziali nei bassi e negli acuti, mentre lo scoppio di un palloncino ha un buon contenuto energetico al di sotto dei 100 Hz e via via più scarso man mano che si sale in frequenza.

3.3.2 La tecnica *Time Reversal Mirror*

Applicando le proprietà dell'operazione di convoluzione, però, è generalmente possibile ottenere una risposta all'impulso a partire da un segnale qualsiasi $s(t)$, si ha, infatti

$$s^{-1}(t) * s(t) = \delta(t) \quad (3.5)$$

⁹Sarebbe sufficiente un solo periodo di campionamento del sistema di registrazione.

dove $s^{-1}(t)$ è il cosiddetto *filtro inverso*; poiché il prodotto di convoluzione gode della proprietà commutativa, se $h(t)$ è la risposta all'impulso dell'ambiente in questione e $p(t)$ il segnale registrato dal ricevitore, si può scrivere

$$\begin{aligned} p(t) * s^{-1}(t) &= s(t) * h(t) * s^{-1}(t) = \\ &= h(t) * s(t) * s^{-1}(t) = \\ &= h(t) * \delta(t) = \\ &= h(t). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Come già detto, teoricamente $s(t)$ potrebbe essere un qualsiasi segnale, in realtà, però la scelta è limitata dall'operazione di calcolo del filtro inverso, solitamente non banale. Dunque la 3.6 viene di norma applicata a quelle famiglie di segnali il cui filtro inverso è dato dall'inversione letterale del segnale sull'asse dei tempi, ossia dalla sua lettura dall'ultimo al primo campione¹⁰, per questa ragione tale tecnica prende il nome di *Time Reversal Mirror*. Esempi di segnali siffatti sono le sequenze a lunghezza massima (paragrafo 3.3.4) e gli *sweep* sinusoidali (paragrafo 3.3.5).

3.3.3 Convoluzione inversa nel dominio della frequenza

Un suggerimento per un altro metodo è data dalla relazione 3.3, applicazione del già citato teorema della convoluzione: la trasformata secondo Fourier della risposta all'impulso $h(t)$ può essere ricavata rapportando $P(f)$ con $S(f)$, ossia, in simboli:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{P(f)}{S(f)} \right] \quad (3.7)$$

dove con \mathcal{F}^{-1} si intende l'operazione di trasformata inversa di Fourier.

La 3.7 ha, però, almeno due problemi che è necessario considerare prima di procedere alla sua applicazione; il primo riguarda lo spettro del segnale $s(t)$: se quest'ultimo ha componenti frequentuali di ampiezza nulla, il quoziente diverge,

¹⁰Qualsiasi registrazione avente per fine una misura acustica - ma non solo - è eseguita mediante strumentazione digitale, pertanto viene sottinteso che ogni processo di registrazione includa sempre e comunque un campionamento.

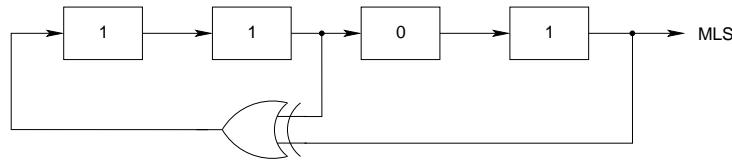


Figura 3.5: Esempio di registro a scorimento a 4 bit.

pertanto il suddetto segnale deve avere trasformata di Fourier non nulla per ogni frequenza della banda udibile.¹¹ L'altro problema è legato all'algoritmo comunemente usato per calcolare la trasformata secondo Fourier, la cosiddetta *Fast Fourier Transform (FFT)*, in particolare nella lunghezza della finestra temporale adottata per il calcolo: se questa è più breve della durata dell'impulso da determinare, si verifica il fenomeno detto *time aliasing*¹², in conseguenza del quale la parte iniziale di $h(t)$ viene alterata, falsando dunque la misura.

Un affinamento è inoltre ottenibile mediante opportuno trattamento del rumore di fondo, determinando le funzioni di *autospettro* (G_{SS} , G_{PP}) e *cross-spettro* (G_{SP}) medi dei due segnali, quindi calcolando la risposta all'impulso mediante la relazione:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}[H_1(f)] = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{G_{SP}(f)}{G_{SS}(f)}\right] \quad (3.8)$$

3.3.4 I segnali MLS

Il metodo descritto al paragrafo precedente è implementabile, in linea di principio, con qualsiasi segnale $s(t)$ a banda larga; vi sono però alcune tipologie di segnali le cui caratteristiche contribuiscono in modo determinante a semplificare i processi di calcolo, a renderli più veloci e ad ottenere una misura più affidabile. Tra questi rientrano certamente i segnali *Maximum Length Sequence (MLS)*. Si tratta di sequenze binarie determinabili con lo schema di figura 3.5, previo posizionamento corretto della porta **XOR** ed imposizione di opportuni valori iniziali.

I vantaggi derivati dall'impiego di *MLS* sono notevoli:

¹¹Un segnale che presenta queste caratteristiche è, ad esempio, il rumore bianco.

¹²Esso è dovuto alla natura “circolare” del procedimento di calcolo.

- la sequenza è deterministica, pertanto se ne ricava l'inversa semplicemente leggendo i campioni dall'ultimo al primo;
- è un segnale binario formato soltanto da ‘1’ e ‘0’: nei calcoli dei prodotti di convoluzione le moltiplicazioni non sono più necessarie e restano, così, solo le somme;
- è altresì possibile calcolare in modo estremamente rapido una convoluzione nel dominio del tempo utilizzando l'algoritmo *Fast Hadamard Transform*¹³;
- il segnale in ingresso è generato direttamente da un circuito come quello in figura 3.5 e dunque non va campionato;
- lo spettro risulta piatto come quello del rumore bianco.

Per contro, il principale difetto consiste nell'estrema sensibilità di questa tecnica agli eventuali effetti di distorsione non lineare presenti nella catena di riproduzione elettroacustica, in particolare di altoparlanti e microfoni. Tali fenomeni provocano, in seguito all'operazione di convoluzione inversa, la comparsa di “picchi spuri” nel segnale misurato, del tutto simili ad echi, in realtà, inesistenti. Da ciò, la necessità di un sistema di riproduzione/registrazione di elevata qualità e funzionante ben al di sotto dei propri limiti, pena l'ottenimento di una misura completamente irrealistica.

I notevoli pregi connaturati al procedimento e l'esistenza di un sistema hardware-software¹⁴ commerciale che lo implementa hanno, comunque, fatto sì che fosse il più usato fino a 6–7 anni fa.

3.3.5 I segnali *Sine Sweep*

L'attuale standard qualitativo di riferimento alle misure di risposta all'impulso è senz'altro costituito dalla tecnica impiegante segnali di tipo *Sine Sweep*; essa si può dire che contenga tutti i pregi di quella ad *MLS* senza, però, averne i difetti, infatti l'unico inconveniente derivante dall'uso di simili segnali è l'impossibilità di utilizzare la trasformata di Hadamard, dunque il passaggio nel dominio della

¹³Per la definizione della trasformata di Hadamard si veda A.7

¹⁴Scheda audio e software *MLSSA*.

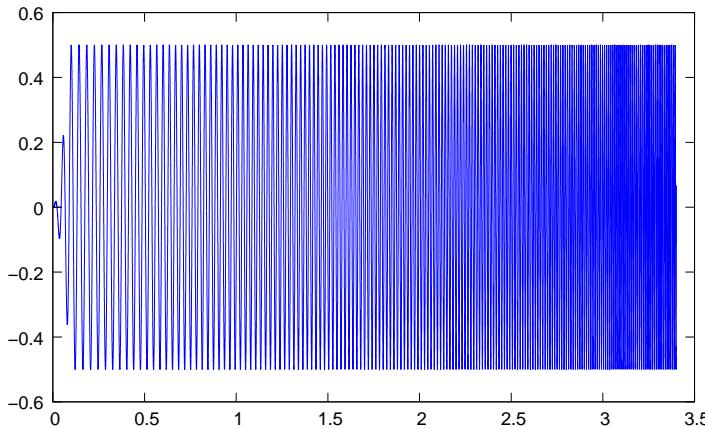


Figura 3.6: Dettaglio di un segnale di tipo *Sine Sweep* esponenziale.

frequenza va compiuto tramite un algoritmo *FFT*, tuttavia la perdita di prestazioni in termini di calcolo che si avrebbe avuta qualche lustro fa è pienamente compensata dalla potenza di elaborazione dei sistemi odierni.

La descrizione di un segnale *Sine Sweep* è presto fatta: come suggerisce il nome stesso, si tratta di una sinusode la cui frequenza aumenta col tempo, entro i limiti della banda audio (vedi figura 3.6). Fondamentalmente ne esistono due tipi, lineare ed esponenziale, dalle caratteristiche simili, tuttavia è il secondo ad essere preferito per via della intrinseca rassomiglianza alla pratica musicale; infatti esso viene prodotto facendo in modo che la velocità con cui aumenta la frequenza percepita risulti costante su un asse logaritmico: in pratica, al raddoppio dell'intervallo di tempo, raddoppia anche la frequenza.

Risulta invece un poco più complessa la generazione del filtro inverso di un segnale *Sine Sweep* esponenziale, poiché, mentre per il corrispettivo lineare tale filtro è l'inversione sull'asse dei tempi del segnale stesso¹⁵ in quanto lo spettro è bianco, quest'altro invece ha spettro rosa¹⁶, è dunque necessario che quello del filtro sia in grado di compensarlo. Ciò viene normalmente effettuato applicando un filtraggio delle ampiezze con pendenza positiva di 6 dB/oct.

¹⁵Esattamente come una per una *MLS*.

¹⁶Lo spettro di un segnale si dice *rosa* quando il livello sonoro delle componenti frequenziali diminuisce dalle basse verso le alte frequenze, con una pendenza di 3 dB/oct.

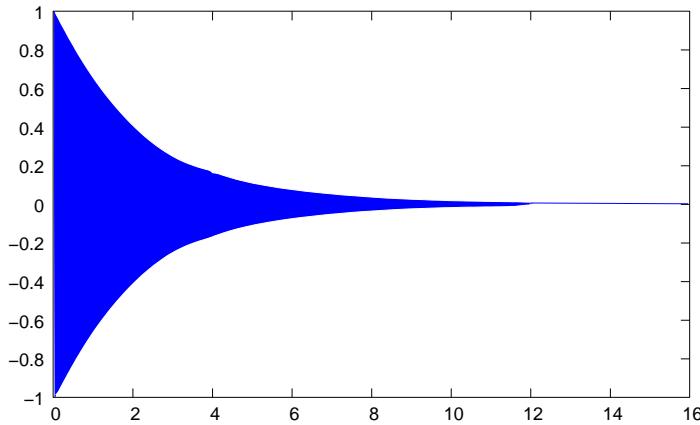


Figura 3.7: Filtro inverso di un segnale di tipo *Sine Sweep* esponenziale.

Fino ad ora le rassomiglianze col metodo basato su *MLS* sono diverse, alle quali si assomma perfino qualche complicazione, vi è, però, un enorme vantaggio non ancora menzionato, ossia l'intrinseca e pressoché completa insensibilità alla distorsione armonica della catena elettroacustica ed al rumore di fondo. In particolare è addirittura possibile valutare la prima, poiché in ogni risposta all'impulso calcolata a impiegando questo metodo le componenti dovute alla distorsione sono ben individuabili nel diagramma sia temporale che tempo/frequenza, come picchi precedenti, nel tempo, quello dovuto all'onda diretta (figura 3.8). Quindi connettendo direttamente l'ingresso all'uscita del sistema¹⁷ e compiendo l'intera procedura per la determinazione della risposta all'impulso, si potrà addirittura quantificare la distorsione introdotta dal sistema.

¹⁷Un vero e proprio *loop* tramite cavo, oppure, se non è possibile, collocando il microfono molto vicino all'altoparlante.

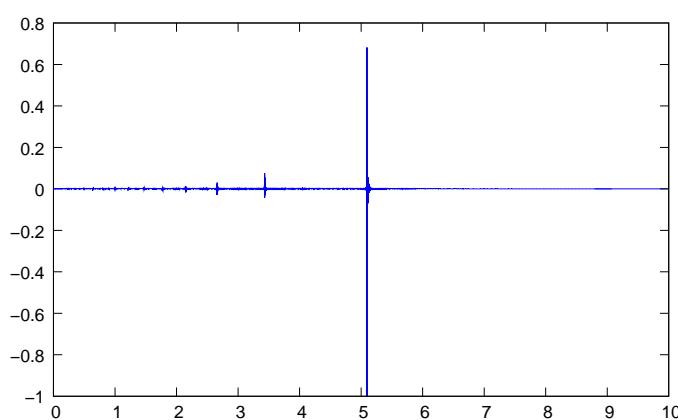


Figura 3.8: Risposta all'impulso determinata con la tecnica *Sine Sweep*.

Capitolo 4

Modelli previsionali numerici del campo acustico

Ai fini dello studio e della progettazione acustica di un ambiente è essenziale elaborarne una corretta caratterizzazione; nel capitolo 2 sono stati illustrati due approcci che, almeno in linea teorica, consentono di farlo, l'uno in maniera esatta, l'altro in modo *statisticamente* verosimile. Quando, però, la complessità geometrica dell'ambiente aumenta, carta e matita non sono più sufficienti per i calcoli da svolgere: è necessario l'uso di un computer e di opportuni *software* di modellazione numerica del campo acustico. Tuttavia non sempre è fondamentale risolvere le equazioni di d'Alembert: sotto opportune condizioni il cosiddetto *metodo geometrico* consente di determinare tutti i principali parametri acustici con un'approssimazione di gran lunga migliore di quella ottenibile tramite un approccio puramente statistico. Questa è la strada scelta dagli sviluppatori del pacchetto *Ramsete* impiegato per tutte le simulazioni compiute durante questo lavoro di tesi.

4.1 Il metodo geometrico

È noto quale sia il fenomeno alla base dei suoni comunemente percepiti: si tratta di onde di pressione, ossia una perturbazione della pressione ambientale che si propaga alla velocità del suono c dalla *causa* di detta perturbazione verso lo spazio circostante. Tali onde sono matematicamente descritte dalle equazioni

di d'Alembert, sulle quali è basata la teoria modale riportata al paragrafo 2.2.1. L'applicazione di questa teoria si rivela, però, computazionalmente molto onerosa nella maggior parte dei casi concreti, da cui gli sforzi per semplificare l'approccio cercando di mantenere elevata la bontà dei risultati. La teoria geometrica va esattamente in questa direzione assumendo l'abbandono sostanziale del concetto di onda.

La validità del metodo geometrico non è però generale: deve infatti essere verificata l'ipotesi su cui essa è basata, cioè

$$\ell \gg \lambda \quad \text{con} \quad \ell = \min(l_x, l_y, l_z) \quad (4.1)$$

dove l_x , l_y ed l_z sono le lunghezze delle dimensioni fisiche dell'ambiente, mentre λ è la minima lunghezza d'onda d'interesse.

Dunque, se è vera la 4.1, allora è possibile confondere la propagazione di un'onda sferica con quella di un numero infinito di *raggi sonori*, i quali procedono sempre in linea retta, a velocità costante e trasportando una ben determinata quota di energia¹; conseguentemente scompaiono tutti i fenomeni relativi alla natura ondulatoria del suono², sostituiti dalle leggi dell'ottica geometrica. Secondo il metodo geometrico, pertanto, un raggio sonoro propagandosi si comporta esattamente come un raggio luminoso.

4.1.1 La riflessione

In base al principio esposto poc'anzi, quindi, ad un impatto contro una superficie, seguirà una riflessione del raggio sonoro lungo la direzione avente il medesimo angolo rispetto alla perpendicolare nel punto di contatto della direzione incidente, come visibile in figura 4.1 a); per determinare le direzioni dei raggi riflessi, è, però, abitualmente adottato il metodo delle *sorgenti immagine*, la cui pratica risulta assai più semplice rispetto alla misura od al calcolo degli angoli. Si tratta di una banale costruzione geometrica, per la quale si procede nel modo seguente:

¹L'energia sonora viene equamente ripartita tra tutti i raggi, in accordo con il diagramma di direttività della sorgente.

²Tale drastica semplificazione proviene dall'aver idealmente scomposto un fronte di un'onda in infiniti angoli solidi, ognuno dei quali è rappresentato da un raggio.

1. si individuano sorgente (ideale, puntiforme) e punto di impatto;
2. dalla sorgente si traccia il segmento perpendicolare alla superficie di impatto;
3. si prolunga il segmento di cui al punto precedente nell'area retrostante la superficie di una lunghezza pari a quella già tracciata: si sarà così individuata la *sorgente immagine*;
4. il segmento congiungente la sorgente immagine col punto di impatto avrà la medesima direzione del raggio riflesso, che ne costituirà un prolungamento;
5. per gli eventuali impatti successivi si riparte da capo, sostituendo, però, la sorgente reale con la sorgente immagine precedentemente determinata.

Un'esemplificazione del metodo è visibile in figura 4.1 b), mentre in figura 4.2 è riportato un caso di sorgente immagine del second'ordine, ossia dovuta ad una seconda riflessione del raggio sonoro. Reiterando la costruzione, si otterranno, naturalmente, sorgenti immagine di terzo, quarto, n -esimo ordine; è comunque ragionevole limitare l'ordine delle sorgenti immagine da considerare, poiché in uno spazio tridimensionale, per una sorgente di ordine i esistono tante sorgenti di ordine $i + 1$ quante sono le superfici dell'ambiente. Più in generale, se N è il numero di pareti, il numero di sorgenti di ordine i è dato da:

$$n_i = N \frac{(N-1)^i - 1}{N-2}. \quad (4.2)$$

Ai paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 è già stato introdotto il fenomeno dell'assorbimento e qui viene immediatamente ripreso ed approfondito: infatti, escludendo il caso ideale di materiale perfettamente fonoriflettente, ad ogni impatto l'energia del raggio non rimane la stessa, ma diminuisce di una quantità dipendente dalla tipologia del materiale di cui è costituita la superficie; è tempo, quindi, di dare una nuova definizione del coefficiente di assorbimento acustico, che, in questo contesto, riceve anche l'aggettivo *apparente*, differente nella forma rispetto alla 2.24, ma non nella sostanza:

$$\alpha = \frac{E_i}{E_r}, \quad (4.3)$$

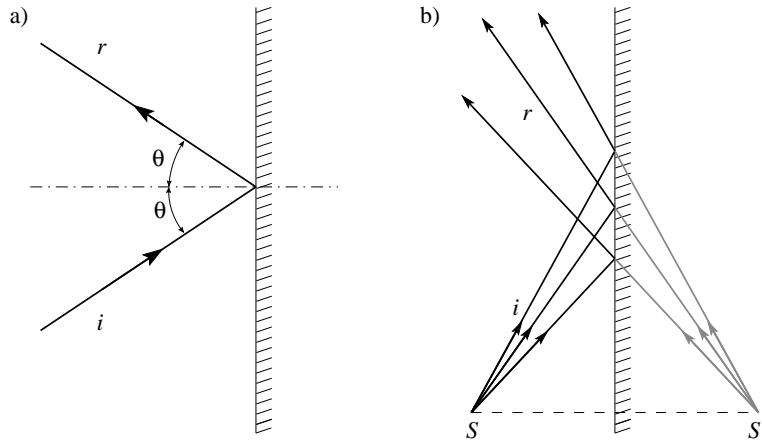


Figura 4.1: Riflessione speculare a) e costruzione della sorgente immagine b).

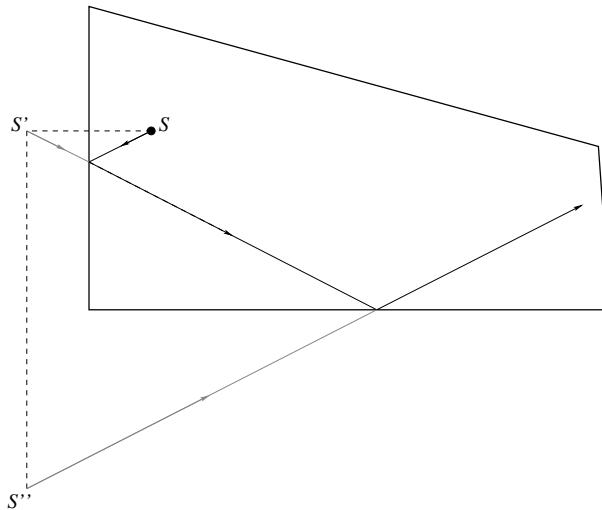


Figura 4.2: Costruzione di sorgenti immagini del primo e secondo ordine.

dove E_i e E_r sono, rispettivamente, l'energia incidente associata al raggio e quella riflessa. Va da sé che, se α è la frazione di energia assorbita dalla superficie, quella da associare al raggio riflesso sarà data da:

$$E_r = (\alpha - 1)E_i. \quad (4.4)$$

Il coefficiente $\alpha - 1$ prende anche il nome di *coefficiente di riflessione* e viene indicato con r .³

³Si ritiene importante effettuare ora una precisazione; in questa sede le considerazioni sono di tipo energetico, pertanto ci si riferisce unicamente ai moduli dei parametri. In realtà,

È bene ora chiarificare la denominazione *coefficiente di assorbimento acustico apparente*: essa sta ad indicare che l'energia non riflessa non viene interamente assorbita dal materiale. Come l'esperienza comune insegna, solo una parte di essa si tramuta in calore per via dei moti vibrazionali - talora impercettibili - indotti alla superficie stessa, mentre la frazione restante viene trasmessa al locale attiguo (figura 4.3). La maggior o minore entità di quest'ultima è misurata dal coefficiente di trasmissione t definito nel seguente modo

$$t = \frac{E_t}{E_i}, \quad (4.5)$$

dove E_t è l'energia trasmessa⁴; analogamente la frazione di energia trasformata in calore è misurata dal coefficiente di assorbimento a . Pertanto si ha:

$$a + r + t = 1. \quad (4.6)$$

Si badi, inoltre, che tutti i summenzionati coefficienti sono fortemente dipendenti dalla frequenza.⁵

Da queste considerazioni consegue che il numero di riflessioni di un raggio sonoro che si propaga in un ambiente chiuso non è infinito, poiché l'energia fornita dalla sorgente, prima o poi, si esaurisce per effetto dei fenomeni di cui sopra.

4.1.2 La diffusione

L'applicazione del metodo della riflessione speculare restituisce eccellenti risultati soprattutto nei casi di impatti con superfici lisce o, comunque, con irregolarità di dimensioni non confrontabili con la lunghezza d'onda delle frequenze in esame;

analogamente ai fenomeni ondulatori elettromagnetici, il coefficiente di riflessione è un numero complesso, pertanto altera tanto il modulo quanto la fase del fasore associato all'onda incidente. Si parla, allora, di *Complex Reflection Factor (CRF)*, per la cui definizione si rimanda all'appendice A.2.

⁴Il coefficiente di trasmissione t è in realtà poco utilizzato; si preferisce il suo reciproco, denominato *coefficiente di fonoisolamento*, indicandolo con R .

⁵Come già ricordato al paragrafo 2.2.2 dipendono anche dall'angolo di incidenza, per ragioni di semplicità si tende però a trascurare volentieri questo aspetto

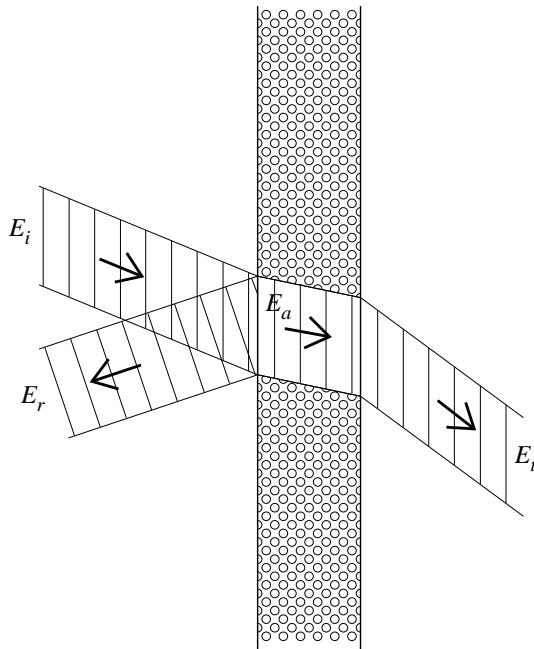


Figura 4.3: Schematizzazione dei fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione di un'onda sonora.

quando, però, queste condizioni vengono meno e si hanno, per esempio, pareti caratterizzate da una certa *rugosità*, la riflessione del raggio sonoro non sarà più perfettamente speculare, una parte dell'energia incidente verrà infatti frammentata e riflessa lungo un numero infinito di direzioni. Si tratta del fenomeno della *riflessione parzialmente diffusa*, al quale, peraltro, si deve la maggior uniformità di distribuzione dell'energia sonora di norma rilevata negli ambienti rispetto a quella indicata dal semplice metodo delle sorgenti immagine. Una descrizione quantitativa della diffusione⁶ è data dalla *legge di Lambert*,

$$I_r = I_i dS \cos \theta_i \frac{\cos \theta}{\pi r^2} \quad (4.7)$$

con la quale è possibile determinare l'intensità del raggio riflesso con angolo θ (figura 4.4) ad una distanza r dall'elemento di superficie avente dimensione dS . La 4.7 è una relazione sostanzialmente bidimensionale che, in realtà, va applicata per ogni valore di θ di tutti i piani che si ottengono dalla rotazione del piano del foglio rispetto all'asse tratteggiato di figura 4.4.⁷ Nulla cambia per quanto

⁶Anche in questa circostanza proveniente dall'ottica geometrica.

⁷Se si identifica il punto di impatto con l'origine di un sistema di assi cartesiani, si può

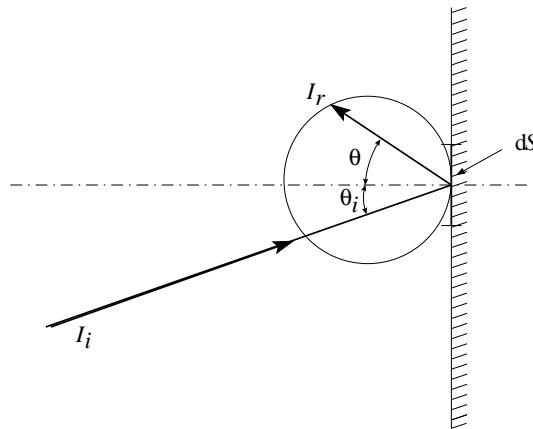


Figura 4.4: Riflessione diffusa di un elemento dS di superficie irregolare.

concerne l'assorbimento dell'elemento dS : l'energia complessivamente riflessa è sempre data dalla 4.4.

4.1.3 La risposta all'impulso energetica

Il metodo geometrico di analisi della propagazione del suono è un primo, importante, strumento per determinare quello che è già stato definito come il più importante rilievo acustico per ambienti chiusi, la risposta all'impulso. C'è, però, una fondamentale differenza con quanto esposto al capitolo 3: in questo caso, infatti, mancano le informazioni relative alla fase dell'onda⁸, inoltre i coefficienti finora descritti si applicano all'energia del raggio, mentre una risposta all'impulso misurata è necessariamente un segnale in pressione.⁹

Il procedimento è concettualmente semplice: al solito si suppone di disporre nell'ambiente in questione una sorgente ed un ricevitore, entrambi puntiformi; ad un certo istante, che verrà fissato come origine dell'asse dei tempi, si fa emettere alla sorgente un impulso di durata trascurabile ed uguale intensità in tutte le direzioni. Tale impulso giungerà al ricevitore seguendo la via più breve - l'*onda diretta* -, ma, dopo un certo tempo, anche in seguito ad una, due, n riflessioni ed in questi

affermare che esiste un raggio diffuso per ogni coppia di valori degli angoli di azimut ed elevazione.

⁸Si ricorda che le assunzioni compiute per l'applicazione del metodo geometrico di fatto eliminano il concetto di onda.

⁹I microfoni di misura omnidirezionali sono a tutti gli effetti sensori di pressione.

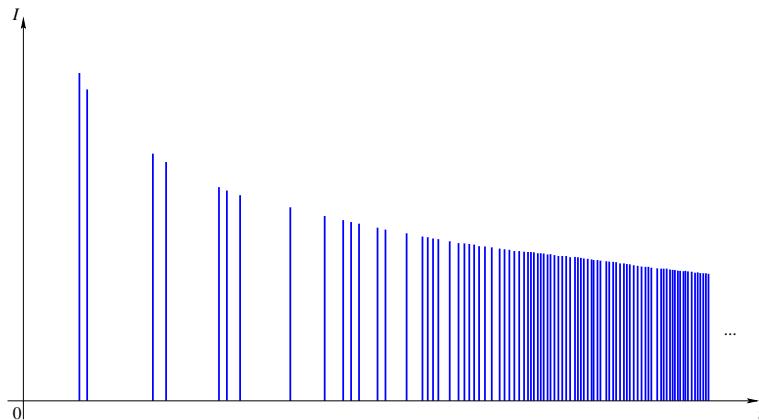


Figura 4.5: Risposta all'impulso energetica: riflessioni al trascorrere del tempo.

casi l'intensità risulterà ridotta, in accordo con i coefficienti di assorbimento dei materiali contro cui sono avvenuti gli impatti.

Se ora si dispongono in un diagramma tempo/energia i livelli d'intensità rilevati dal ricevitore in corrispondenza dei relativi istanti di tempo si otterrà proprio la risposta all'impulso energetica o *ecogramma*. Osservando la figura 4.5 si possono subito individuare, immediatamente a ridosso dell'onda diretta, livelli energetici elevati, a distanze abbastanza irregolari, proseguendo verso la fine del diagramma, i livelli diminuiscono e si avvicinano nel tempo: la prima parte è detta delle *prime* o *singole* riflessioni, la seconda costituisce, invece, la coda riverberante. Mentre le prime riflessioni si possono convenientemente determinare col metodo delle sorgenti immagine, nella coda riverberante il numero di queste ultime diventa talmente elevato da renderne straordinariamente complesso il calcolo. Il metodo statistico risulta in questo caso vincente, fornendo comunque un risultato più che soddisfacente.

4.2 Algoritmi di tracciamento

Il metodo di analisi descritto ai paragrafi precedenti è a tutti gli effetti un sistema per prevedere l'andamento del campo acustico in un ambiente chiuso; dalla sua parte ha una notevole semplicità concettuale ed applicativa quando l'ordine delle sorgenti immagine non è elevato, per contro vi sono tutte le approssimazioni ad esso intrinseche e le complessità computazionali cui si faceva riferimento in

precedenza. Non è naturalmente l'unico sistema adottato. Ve ne sono almeno due, alternativi, che, in una certa misura, ne sono diretti discendenti:

- il *ray-tracing*,
- il *beam-tracing*.

Entrambi sono nati nel momento in cui è risultata impellente la necessità di disporre di un programma per elaboratore elettronico in grado di svolgere automaticamente le costruzioni ed i calcoli per l'applicazione, ad esempio, del metodo geometrico. L'impossibilità di disporre di quantità neppure lontanamente prossime all'infinito di tempo oppure di raggi tracciati ha aperto la strada alla prima delle tecniche sopra elencate; con *ray-tracing* si intende, infatti, il tracciamento di un certo numero di raggi con direzione casuale¹⁰, il rilievo degli impatti con le superfici dell'ambiente, la correzione energetica che ne consegue, quindi l'impatto finale con il ricevitore. Così facendo si produrrà una stima o *rendering*¹¹ del campo acustico nel punto dello spazio in cui è collocato il ricevitore. Le riflessioni sono gestite secondo il metodo geometrico, pertanto ogni superficie sarà caratterizzata dal coefficiente di assorbimento relativo al materiale.¹²

I limiti propri di una simile tecnica non sono certo pochi, il primo, nonché il più importante, è ben sintetizzato dalla domanda: quanti raggi è opportuno tracciare? La risposta, quasi retorica, è: il maggior numero possibile. Questo perché una sorgente sonora emette onde di pressione sferiche, di cui l'insieme di raggi è solo una remota - ma comoda - approssimazione. Bisogna, inoltre, considerare il fatto che se la sorgente è modellata come puntiforme, potrebbe trascorrere parecchio tempo prima di rilevare un impatto col ricevitore; per questa ragione nei *software* che adottano tale algoritmo si usano d'abitudine ricevitori sferici e l'energia immagazzinata è quella associata al segmento che interseca la superficie sferica (figura 4.6), data dalla relazione

¹⁰L'origine, ovviamente, è comune ed è la sorgente sonora.

¹¹Tale termine proviene non a caso dall'ambiente dei *software* di disegno tridimensionale: è qui, infatti, che la tecnica del *ray-tracing* ha vissuto e vive il suo maggior sviluppo, applicata, però, ai raggi luminosi.

¹²Nulla vieta di specificare, ad esempio, anche il fonoisolamento; è tuttavia essenziale che tali parametri siano sempre definiti in funzione della frequenza.

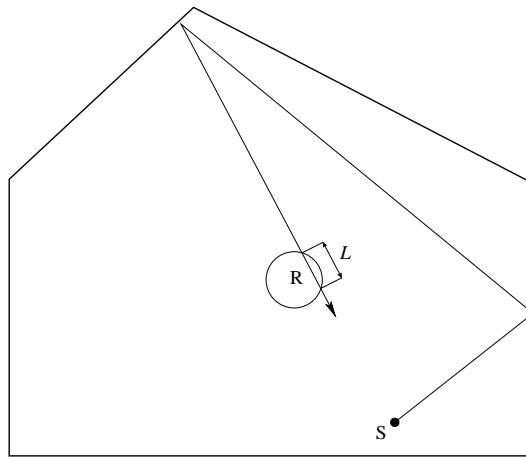


Figura 4.6: *Ray-tracing*: schematizzazione dell’“impatto” di un raggio con il ricevitore.

$$D' = \frac{P_s Q_\delta L \prod_i (1 - \alpha_i)}{c N_{\text{rays}} V_{\text{sphere}}} e^{-\gamma d} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right], \quad (4.8)$$

dove P_s è la potenza emessa dalla sorgente, Q_δ la direttività relativa alla direzione del raggio all’origine rispetto alla sorgente, L la lunghezza dell’intersezione del raggio con la sfera, mentre $e^{-\gamma d}$ è un fattore che tiene conto del potere assorbente dell’aria in funzione della distanza d percorsa dal raggio. Il risultato D' è una densità di energia per via del ricevitore caratterizzato da volume non nullo. La tecnica del *ray-tracing* produce eccellenti risultati, tuttavia, il tracciamento di un numero molto alto di raggi si traduce immediatamente in tempi di calcolo altrettanto elevati.

Una soluzione a quest’ultimo problema è fornita dalle tecniche di tracciamento di fasci divergenti, o *beam-tracing*, cui fanno parte il *cone-tracing* ed il *pyramid-tracing*. Entrambi i sistemi si propongono di effettuare il *rendering* del campo sonoro assegnando l’energia acustica non ad un singolo raggio, ma ad un fascio di essi, efficacemente modellato con una piramide od un cono avente il vertice coincidente con la sorgente. Ancora una volta, però, le basi di tali fasci dovranno approssimare nel miglior modo possibile la superficie di un’onda sferica, ragione per cui il tracciamento tramite coni si rivela immediatamente insoddisfacente; come mostrato dalla figura 4.7, infatti, le basi dei solidi debbono necessariamente

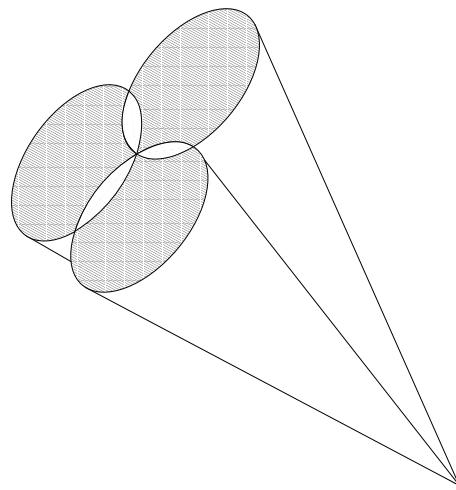


Figura 4.7: *Cone-tracing*: sovrapposizione dei fasci.

sovraporsi per ricoprire interamente la superficie sferica, e questo provoca un irrealistico aumento di energia nelle regioni d'intersezione.¹³

È naturalmente possibile scrivere un algoritmo che tenga conto di quest'effetto, tuttavia è probabilmente più semplice scegliere un solido piramidale la cui base possegga la proprietà di tassellare¹⁴ una superficie sferica, e questo è ciò che hanno fatto gli autori del software *Ramsete*, affidandosi ai fasci piramidali a base triangolare¹⁵ (si veda la figura 4.8).

Ciò che viene concretamente tracciato dall'algoritmo, non è l'intera piramide, bensì l'asse di quest'ultima che, incontrando le pareti, segue le medesime leggi di riflessione del *ray-tracing*; in accordo con la natura divergente del fascio, istante per istante¹⁶ viene incrementata l'area della base e si assume che un ricevitore rilevi energia sonora quando si trovi all'interno di essa. Così facendo non sono più necessari ricettori volumetrici come nel caso del *ray-tracing*, ma questi pos-

¹³Similmente al caso dei raggi, ad ogni sezione del solido è assegnata una determinata energia.

¹⁴Si può dire che un poligono di area A *tassella* una superficie di area B (con $A < B$) quando la ricopre interamente senza lasciare spazi mediante repliche identiche di se stesso.

¹⁵La suddivisione corretta della superficie sferica in tasselli triangolari viene effettuata con una versione modificata dell'algoritmo di Tenenbaum, col quale si ottiene un numero uguale ad una potenza di 2 di fasci piramidali.

¹⁶Il tempo è ovviamente discretizzato; il quanto è modificabile dall'utente.

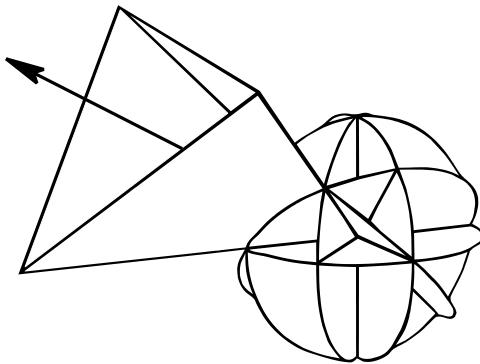


Figura 4.8: *Pyramid-tracing*: generazione dei fasci mediante suddivisione della superficie sferica.

sono essere modellati come puntiformi ideali, a tutto vantaggio della semplicità dell'algoritmo.

Il valore immagazzinato come “energia ricevuta” è, in realtà, una *intensità sonora scalare* che ha ben poco a che vedere con quanto misurato dagli intensimetri, si tratta, infatti, di un valore fittizio, legato al quadrato della pressione sonora, e dato dalla

$$I = \frac{Q}{4\pi d^2} \prod_i (1 - \alpha_i), \quad (4.9)$$

in cui Q è la direttività¹⁷ nella direzione considerata e d la distanza tra sorgente immagine e ricevitore.

Allo stato attuale l'energia emessa dalle sorgenti impiegate in *Ramsete* è suddivisa nelle 10 bande d'ottava normalizzate, ognuna delle quali è trattata separatamente dalle altre: ciò porta a disporre di risultati anch'essi utilmente divisi in bande d'ottava.

Si vuole, inoltre, evidenziare un'altra caratteristica connaturata al sistema *pyramid-tracing*: l'andamento naturalmente divergente dei fasci farà sì che, da un certo punto in poi del periodo di tracciamento, la base della piramide avrà area superiore a quella dell'intero ambiente, cioè tutti i ricettori presenti rileveranno l'energia ad essa associata. Questa situazione garantisce la presenza di un dettaglio suffi-

¹⁷In *Ramsete* per ogni sorgente è possibile specificare un diagramma (*balloon*) di direttività per ognuna delle 10 bande d'ottava.

ciente nella coda riverberante, che può quindi essere interamente ottenuta per via deterministica senza che compaiano sorte di “frastagliamenti” tipici di altri sistemi di calcolo. Analogamente a tutti i sistemi di tracciamento a fasci divergenti, però, l’energia della coda sonora tende ad essere sottostimata in campo riverberante, poiché all’aumentare dell’estensione superficiale della base del fascio, aumenta anche la probabilità che l’algoritmo non riesca ad individuare correttamente la presenza di una sorgente immagine.¹⁸ Diviene, allora, necessario compiere una correzione della suddetta coda, inutile con la tecnica del *ray-tracing*.¹⁹ Nel software *Ramsete* tale correzione è di tipo moltiplicativo, secondo quanto suggerito da Naylor, ed avviene impiegando la relazione

$$I_{\text{corr}}(t) = \frac{I(t)}{1 - e^{-\frac{l_{\text{cm}}^2 N}{4\beta c^2 t^2}}} \quad (4.10)$$

dove l_{cm} è il cammino libero medio statisticamente determinato da *Ramsete* in base alla lunghezza degli assi delle piramidi complessivamente tracciate, mentre β è un coefficiente adimensionale che dipende dalla natura più o meno sabiniana del campo sonoro.²⁰

Infine nel *pyramid-tracing* la precisione del risultato non dipende in modo così determinante dal numero di piramidi tracciate, quest’ultimo, infatti, è funzione solo della risoluzione temporale desiderata della risposta all’impulso e non della sua lunghezza.

¹⁸In parole povere, questa viene “persa”.

¹⁹A patto di aver tracciato il numero corretto di raggi, però.

²⁰Se il campo è perfettamente diffuso, β vale 0.1.

Capitolo 5

L'auralizzazione

La teoria e le tecniche di analisi finora esposte forniscono senz'altro i migliori strumenti possibili per accostarsi alla progettazione di sale cui siano richieste particolari prestazioni di tipo acustico; tuttavia l'esperienza individuale di ascolto, come già accennato precedentemente, ha una preponderante componente psichica che potrebbe condizionare risultati altrimenti ineccepibili dal punto di vista dei calcoli. D'altro canto, come è possibile avere una simile esperienza in un luogo che non è ancora stato costruito, oppure acusticamente trattato? Il processo di *auralizzazione* di un segnale audio mediante i risultati opportunamente trattati di una simulazione acustica, descritto nei paragrafi a seguire, tenta di rispondere a questo interrogativo.

5.1 Il filtraggio di segnali anechoici

La tecnica dell'auralizzazione prende il nome dal corrispettivo ottico, *visualizzazione*: in termini teorici significa prendere un'informazione sonora decontestualizzata ed introdurla in un contesto noto. Per scendere, quindi, alla realizzazione pratica ci si deve ricondurre alla teoria dei sistemi lineari tempo invarianti introdotta nel paragrafo 3.1 dalla quale è immediato dedurre come la risposta all'impulso, per l'appunto detta anche funzione di trasferimento, contenga tutte le informazioni relative al *contesto* di cui si necessita. L'auralizzazione non sarà, dunque, altro se non un'applicazione della relazione 3.2 che si riporta di seguito per comodità:

$$p(t) = s(t) * h(t), \quad (5.1)$$

nel dominio del tempo, e

$$P(f) = S(f) \cdot H(f) \quad (5.2)$$

nel dominio della frequenza. Va da sé che il segnale $s(t)$ dovrà imprescindibilmente essere privo di qualsiasi informazione ambientali, decontestualizzato, cioè, o, più propriamente, *anechoico*¹; il segnale $p(t)$ ottenuto sarà, allora, $s(t)$ contestualizzato nel punto dell'ambiente in questione caratterizzato dalla funzione di trasferimento $h(t)$, in altri termini, ascoltando $p(t)$ si avrà l'impressione di trovarsi nel punto della sala in cui è stata misurata $h(t)$, mentre la sorgente riproduce $s(t)$.

5.1.1 Il caso binaurale

L'ascolto monofonico, pur se di elevata qualità timbrica, è di per sé poco coinvolgente, in quanto completamente privo di *spazialità*, cioè della sensazione di essere fisicamente presenti laddove avviene l'evento sonoro riprodotto; per questa ragione, nel corso degli anni, si è imposto il sistema di riproduzione stereofonica ed oggi giorno si riscontra un notevole interesse nei confronti delle varie tipologie di sistemi *surround*. Ora, però, si vuole concentrare l'attenzione su un altro sistema di riproduzione, meno diffuso, ma più solidamente fondato sulle peculiarità fisiche e psichiche dell'orecchio umano rispetto a quelli precedentemente citati: si tratta del sistema *binaurale*. Il punto di partenza è più o meno lo stesso che ha portato all'ideazione della stereofonia: ogni essere umano è naturalmente dotato di due ricettori acustici, fisicamente disposti in un certo modo, allora un messaggio sonoro registrato con due microfoni e riprodotto con due diffusori opportunamente collocati, dovrebbe creare maggiore spazialità rispetto alla semplice riproduzione monofonica. Il passo successivo compiuto dalla tecnologia binaurale rispetto a

¹Le cosiddette *informazioni ambientali*, infatti, altro non sono che l'insieme di tutte le onde riflesse giunte al ricevitore; gli unici luoghi in cui queste non possono prodursi sono ovviamente artificiali e vengono denominati *camere anechoiche*. In siffatte camere è possibile registrare segnali (musica od altro) adatti per il processo di auralizzazione.

quella stereofonica consiste nella presa di coscienza che il sistema audioricettivo umano, inteso come complesso torso/testa/orecchio esterno, è caratterizzato da una straordinaria complessità, manifestantesi in un vero e proprio filtraggio delle onde sonore che lo investono. In particolare ogni componente dell'orecchio² ha una funzione attiva in questo senso³, dunque è più corretto parlare di una *serie* di filtraggi che precedono la formazione dell'immagine sonora nella mente, la quale, pertanto, ne è funzione.

Scopo del sistema binaurale, dunque, è la registrazione e riproduzione di quei valori di pressione acustica che si presentano all'ingresso del condotto uditivo di ciascun orecchio.

Volendo ora ricavare un modello per l'auralizzazione binaurale, si impiega al solito la teoria dei sistemi LTI e, indicando con $p_r(t)$ il segnale ricevuto dall'orecchio destro e $p_l(t)$ quello ricevuto dall'orecchio sinistro (figura 5.1) si ha

$$p_r(t) = s(t) * h_r(t) \quad (5.3)$$

$$p_l(t) = s(t) * h_l(t), \quad (5.4)$$

dove $s(t)$ è il consueto segnale anecoico, mentre le due funzioni di trasferimento $h_r(t)$ e $h_l(t)$ sono dette *Head Related Transfer Functions (HRTF)* e vengono misurate con tecnica del tutto simile a quelle descritte nel capitolo 3; questa volta, però, i microfoni sono due e vanno collocati nei padiglioni auricolari di appositi manichini⁴, un esempio dei quali è visibile in figura 5.2. Grazie a questi ultimi è possibile collocare i ricevitori nei luoghi fisicamente corretti e, nel contempo, a mantenerli acusticamente isolati: ciò è fondamentale, dal momento che la percezione della spazialità è data dalle differenze, in termini di ritardo relativo o

²La complessità cui si faceva riferimento poco sopra aumenta notevolmente analizzando il comportamento dell'insieme orecchio esterno/orecchio medio/orecchio interno/cervello: al filtraggio doppiamente non lineare (in ampiezza e frequenza) operato dai primi, si va a sommare la rielaborazione del segnale dovuta a quest'ultimo, oggetto degli studi di psicoacustica.

³Una descrizione di questi si può reperire in [5].

⁴Tali manichini sono costituiti da una torso ed una testa dotata di naso ed orecchie riprodotte con elevato grado di fedeltà, ossia tutti quegli elementi che provocano alterazioni significative delle onde sonore prima che giungano all'orecchio interno. Esistono anche coppie di microfoni indossabili, che possono consentire misurazioni ancora più accurate poiché letteralmente *personalizzate*.

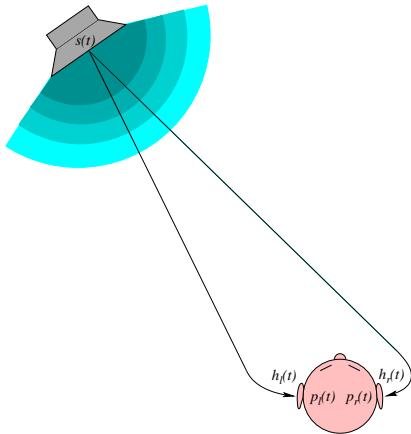


Figura 5.1: *Head Related Transfer Function*: schema della percezione umana.

livello⁵, tra i segnali uditi dalle orecchie, come già menzionato al paragrafo 2.3.4. Per queste ragioni l'ascolto dei segnali $p_r(t)$ e $p_l(t)$ deve avvenire necessariamente tramite cuffia, o al più con un sistema *stereo dipolo*⁶, diversamente la mancanza di isolamento tra canali non omologhi non consentirà di ricreare una corretta sensazione *spaziale*.

5.1.2 Sistemi *Head Tracking*

La notevole sensazione di spazialità offerta dalla riproduzione binaurale, quindi anche dell'auralizzazione dei segnali con tecnica binaurale, viene purtroppo mortificata dalla necessità della riproduzione tramite cuffia, afflitta da ben noti limiti, tra i quali emerge la rigidità dell'asse cuffia-sorgente virtuale: se l'ascoltatore ruota il capo, la sorgente ruota con esso. Un sistema stereo dipolo risolve il problema dell'ingombro dovuto alle cuffie, ma la percezione che ha l'ascoltatore ruotando il capo rimane non corretta e, d'altro canto, l'isolamento interaurale fornito da un buon paio di cuffie rimane comunque migliore. Per salvare tale innegabile pregio

⁵Si parla di *Interaural Time Difference* o *Interaural Level Difference*, meccanismi attivi il primo alle basse frequenze, fino a circa 1600 Hz, il secondo alle alte, laddove la testa costituisce un ostacolo non più trascurabile.

⁶Si tratta di un sistema di riproduzione che impiega casse acustiche analogamente a quello stereofonico, ma i segnali in ingresso vengono preventivamente filtrati per ricostruire una separazione tra i canali all'ascolto.



Figura 5.2: Testa per registrazioni binaurali di fabbricazione *Neumann*.

nell'ottica di una riproduzione binaurale sono stati ideati sistemi detti di *Head Tracking*, vale a dire dotati di sensori in grado di rilevare variazioni degli angoli di orientamento della testa e, in tempo reale, di auralizzare il segnale in riproduzione con una opportuna coppia di *HRTF*. Il sistema, infatti, dovrà disporre di un insieme di queste ultime, ognuna delle quali sarà funzione di determinati valori degli angoli di azimuth ed elevazione⁷ e, affinché le prestazioni in termini di resa spaziale siano soddisfacenti, è bene che vengano misurate *HRTF* per un consistente numero di combinazioni di questi due angoli.⁸

La complessità introdotta in questo modo è notevole, tuttavia i risultati ottenibili sono caratterizzati da uno stupefacente realismo.

5.1.3 Il caso *Ambisonic*

Un approccio differente alla registrazione/riproduzione audio spazialmente caratterizzata è dato dal sistema *Ambisonic*, ideato da Michael Gerzon all'inizio degli

⁷L'angolo di azimuth coincide con l'angolo θ delle coordinate sferiche standard, mentre quello di elevazione con il complementare di ϕ .

⁸Un ragionevole compromesso spesso adottato (*IRCAM*) è la misura a passi di 15° per entrambi gli angoli: l'azimuth varia nell'intervallo $0\text{--}360^\circ$, mentre all'elevazione vengono solitamente assegnati intervalli minori, in accordo con le possibilità di flessione del collo umano e le comuni posizioni delle sorgenti acustiche.

anni '70; la teoria su cui esso si fonda è basata su una descrizione matematica della psicoacustica direzionale, concepita specificatamente per il pilotaggio di sistemi di riproduzione audio *surround* ed è esattamente ciò che mancava al sistema *quadrifonico*, che di qualche anno lo precede. L'obiettivo del sistema è quello di ricostruire le armoniche sferiche⁹ associate all'onda di pressione prodotta dalla sorgente sonora in una certa zona dello spazio; per ottenere un simile risultato due canali non sono sufficienti, poiché si presenta il problema dell'*aliasing*: ogni canale, cui sarà associato uno o più altoparlanti, è infatti interpretabile come un singolo campione dell'onda sferica da ricostruire; se questi sono troppo pochi¹⁰, allora la ricostruzione non sarà corretta.¹¹ Non solo, anche la disposizione degli altoparlanti riveste una grande importanza nella ricreazione di una buona percezione spaziale; la sovente adottata configurazione ad *anello planare*¹², ad esempio, se ben pilotata potrà consentirà ottime ricostruzioni delle onde provenienti da direzioni giacenti sul piano dell'anello, ma ben difficilmente potrà riprodurre in modo spazialmente corretto onde la cui direzione di propagazione ha angolo di elevazione diverso da zero.

Mantenendo, per semplicità, il riferimento a un sistema di ordine 1 e procedendo a ritroso nella catena di riproduzione standard di un sistema *Ambisonic* (figura 5.3), si troveranno gli amplificatori, quindi l'unità che si occupa della decodifica, infine la sorgente; si vuole spostare ora l'attenzione su quest'ultima, o meglio sul segnale in uscita da quest'ultima: esso dovrà necessariamente contenere tutte le informazioni spaziali necessarie al decodificatore *Ambisonic* per la ricostruzione delle armoniche ed ancora una volta due canali non bastano. Fu lo stesso Gerzon a concepire il formato di registrazione adatto per gli scopi di cui

⁹Il concetto di armonica sferica è del tutto analogo a quello delle armoniche bidimensionali di un segnale determinabili tramite analisi di Fourier, nel caso del suono, però, le onde sono tridimensionali e, si dimostra, esprimibili mediante la somma di infinite armoniche sferiche elementari.

¹⁰Premettendo che un sistema *Ambisonic* si dice di ordine n quando è in grado di riprodurre armoniche sferiche di quell'ordine, allo stato attuale non esiste un equivalente della frequenza di Nyquist per il minimo numero di canali necessario in un sistema *Ambisonic* di un dato ordine.

¹¹Per sistemi di ordine 1 si hanno risultati soddisfacenti a partire da 6-7 canali in su

¹²È esattamente come l'intuizione lascia intendere: gli altoparlanti vengono disposti lungo una circonferenza, orientati verso il centro della stessa, il quale sarà occupato dall'ascoltatore.

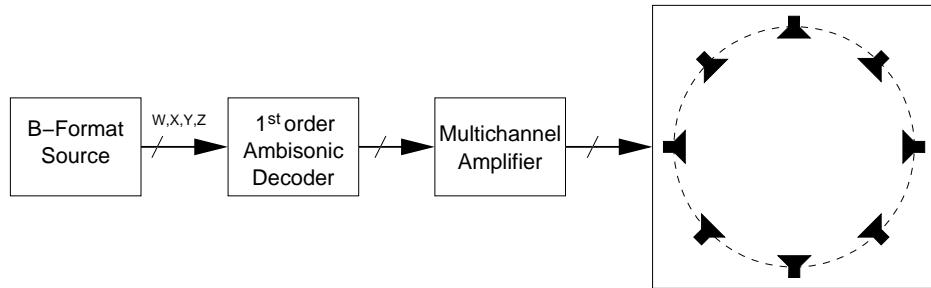


Figura 5.3: Catena di riproduzione di un sistema *Ambisonic*.

sopra, dettando le specifiche del *B-Format*: quattro canali denominati W, X, Y e Z , assegnati a, rispettivamente, una capsula microfonica omnidirezionale e tre capsule *a figura di otto*¹³ con i lobi orientati lungo i tre assi cartesiani ed aventi lo scopo di misurare pressione e le tre componenti del vettore velocità delle particelle in quel punto dello spazio (figura 5.4). In commercio esistono sonde che restituiscono un segnale *B-Format*¹⁴, tuttavia le loro caratteristiche le rendono adeguate per misure, ad esempio, di impedenza acustica dei materiali; dovendo, invece, registrare un'esecuzione musicale, oppure misurare risposte all'impulso di un ambiente, ad esse sono di gran lunga preferiti microfoni aventi una configurazione denominata *A-Format*, nella quale le capsule sono tutte omnidirezionali e collocate sulle facce di un tetraedro, come visibile in figura 5.5; denominando i quattro segnali *A-Format* C_1, C_2, C_3 e C_4 , i canali *B-Format* si ricavano dalle relazioni:

¹³Si tratta di capsule bidirezionali e, a differenza di quelle omnidirezionali, sensibili alla pressione, sono sensibili al *gradiente* della pressione (leggi: alla velocità) poiché vengono esposte al suono incidente entrambe le facce della membrana che funge da sensore.

¹⁴Tali sonde, costruite da *Microflown*, vengono realizzate collocando tre anemometri orientati lungo gli assi cartesiani ed una capsula omnidirezionale nel mezzo. Non esistono, invece, microfoni *B-Format*, vista l'impossibilità tecnica di collocare quattro capsule nel medesimo punto.

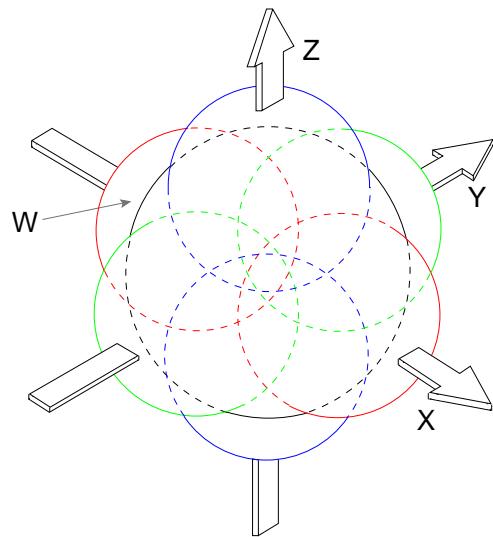


Figura 5.4: Diagrammi polari delle quattro capsule *B-Format*.

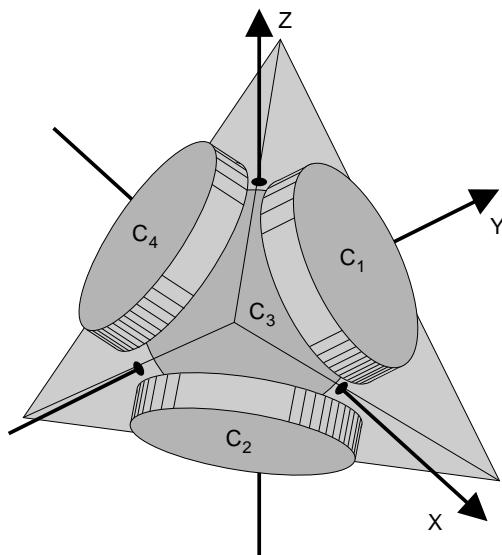


Figura 5.5: Collocazione fisica delle capsule secondo le specifiche *A-Format*.

$$W = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (5.5)$$

$$X = C_1 + C_2 - C_3 - C_4 \quad (5.6)$$

$$Y = C_1 - C_2 + C_3 - C_4 \quad (5.7)$$

$$Z = C_1 - C_2 - C_3 + C_4. \quad (5.8)$$



Figura 5.6: Microfono *SoundField*.

Il microfono *SoundField* (figura 5.6), ad esempio, è costruito secondo le specifiche *A-Format*.

Per auralizzare un segnale anecoico che si desidera ascoltare con un sistema *Ambisonic*, bisognerà quindi disporre di una misura di risposta all'impulso *B-Format* e procedere al filtraggio con le funzioni di trasferimento relative ai quattro canali:

$$p_W(t) = s(t) * h_W(t) \quad (5.9)$$

$$p_X(t) = s(t) * h_X(t) \quad (5.10)$$

$$p_Y(t) = s(t) * h_Y(t) \quad (5.11)$$

$$p_Z(t) = s(t) * h_Z(t). \quad (5.12)$$

5.2 La sintesi di risposte all'impulso

Dopo aver descritto, seppure in modo succinto, l'applicazione del processo di auralizzazione a vari sistemi di riproduzione audio, resta ora da affrontare il punto, forse, di maggior interesse: si è visto che, per contestualizzare acusticamente un segnale in un ambiente esistente, è sufficiente svolgere una serie di misure della

risposta all'impulso secondo le tecniche caratteristiche dei sistemi di riproduzione audio a disposizione; se la sala, però, ancora non esiste, la strada da percorrere sarà evidentemente un'altra ed ha il suo punto di partenza nei software di previsione acustica di cui si è diffusamente scritto al capitolo 4. Il riferimento particolare sarà al pacchetto *Ramsete*, ma le considerazioni saranno di carattere assolutamente generale ed associabili a qualsiasi altro software basato su algoritmi di tracciamento, sia di raggi, che di fasci.

Si ricorda brevemente che cosa produce *Ramsete* in seguito ad una simulazione acustica conclusasi con esito positivo, cioè una matrice di 10 risposte all'impulso energetiche, una per ognuna delle bande d'ottava normalizzate, calcolate con un tempo di campionamento specificato dall'utente.¹⁵ Questo insieme di dati non è di per sé sufficiente a generare una risposta all'impulso tale da poter essere impiegata come funzione di trasferimento in un operazione di auralizzazione; i problemi che prima d'ogni altro balzano all'attenzione sono:

- il tempo di campionamento generalmente ben superiore a quello adottato in qualsivoglia segnale audio: la risposta all'impulso deve caratterizzare l'ambiente in tutta la banda udibile, pertanto non si prendono neppure in considerazione frequenze di campionamento inferiori allo standard CD audio, 44.1 kHz¹⁶;
- la completa assenza di informazioni di fase, prezzo da pagare per aver scelto di caratterizzare acusticamente un ambiente tramite il metodo geometrico.

Inoltre la risoluzione in frequenza è piuttosto scarsa ai fini della generazione di un segnale audio, soprattutto alle alte frequenze, dove viene memorizzata una sola sequenza campione per bande di larghezza considerevole. Ciò che manca va, ovviamente, ricostruito e, in certi casi addirittura "inventato", poiché non sempre i dati prodotti dalla simulazione consentono di ricavare le informazioni assenti con l'accuratezza voluta.

¹⁵ Tipicamente da 1 a 10 ms.

¹⁶ La frequenza di Nyquist è, in questo caso, praticamente coincidente con l'estremo della banda audio, 22050 Hz.

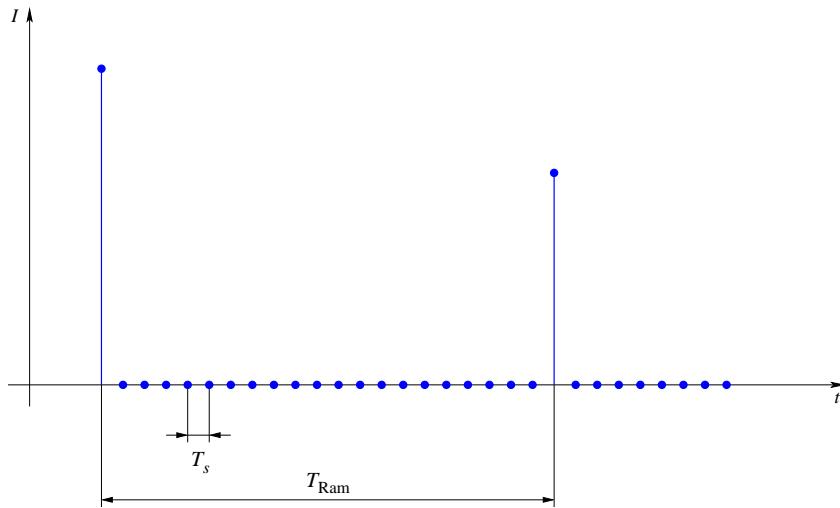


Figura 5.7: Confronto tra tempo di campionamento di *Ramsete* e quello, inferiore, della risposta all'impulso audio desiderata.

5.2.1 Il software *AudioConverter*

Il pacchetto *Ramsete* contiene fin dalle sue prime versioni il software *AudioConverter* di Angelo Farina che fornisce una ormai consolidata soluzione al problema di cui sopra; in termini pratici, la differenza tra il tempo di campionamento di *Ramsete* T_{Ram} e quello desiderato T_s si manifesta con dei veri e propri vuoti tra un campione non nullo ed il successivo, di cui si può vedere un esemplificazione in figura 5.7. Questo è ovviamente da evitare accuratamente in una sequenza audio per una quantità di ragioni, *in primis* l'aspetto assolutamente sintetico sia visivo che auditivo, dovuto al fatto che si tratta di una serie di impulsi unitari ideali, lontana da qualsiasi segnale realmente misurabile. Il medesimo problema si riscontra poi nel dominio della frequenza, come già precedentemente accennato: vi sono 10 sole sequenze campione per l'intera banda audio.

L'approccio di *AudioConverter*¹⁷ è quello di “colmare” i vuoti nel dominio del tempo con spezzoni di rumore bianco o rosa, ognuno dei quali viene modulato in ampiezza con la radice quadrata del campione associato a quel *burst*. Tale procedimento viene replicato per i dieci ecogrammi prodotti da *Ramsete*, quindi

¹⁷Più precisamente del programma *Rams2wav*, del quale *AudioConverter* è un *front-end*.

i risultati vengono sommati, ottenendo così un'unica risposta all'impulso. Tale serie di operazioni può essere formalmente espressa¹⁸ da

$$h[k] = \sum_{l=1}^{10} \sqrt{E_l[m]} \cdot n_{l,m}[k - mN_s] \quad (5.13)$$

dove

$$m = \left\lfloor \frac{k}{N_s} \right\rfloor \quad (5.14)$$

è l'indice del *burst* o, equivalentemente, del campione corrente dell'ecogramma,

$$N_s = \left\lfloor \frac{T_s}{T_r} \right\rfloor \quad (5.15)$$

è il numero di campioni contenuti in un singolo *burst*, E_l è l'ecogramma relativo alla banda di indice l ¹⁹, $n_{l,m}$ un processo stocastico uniformemente distribuito²⁰ e $h[k]$ il campione corrente della risposta all'impulso. La scelta del rumore come “tassello” per raccordare due campioni consecutivi dell'ecogramma è stata dettata da due ragioni fondamentali:

- è un segnale a banda larga, dunque colma anche i vuoti nel dominio della frequenza;
- l'andamento casuale ricostruisce in qualche modo le informazioni di fase, poiché in campo riverberante, dove il numero delle riflessioni cresce in modo esponenziale, la fase dell'onda che raggiunge il ricevitore in un certo istante può ragionevolmente essere rappresentata con una variabile casuale uniformemente distribuita.

¹⁸Seguendo una notazione adottata da svariati testi di elaborazione numerica dei segnali, il generico campione di una sequenza x verrà indicato con $x[k]$, invece che $x(kT)$, dove T è il periodo di campionamento. In questo modo si ritiene siano immediatamente evidenti i riferimenti a segnali tempo-continui (che continueranno ad essere indicati con $x(t)$) da quelli a segnali tempo-discreti.

¹⁹Si riterrà banda di indice 1 quella avente per frequenza di centro banda 31.5 Hz.

²⁰La dipendenza sia da l che da m sta ad indicare che per ogni campione di E_l viene generato un nuovo *burst* di rumore statisticamente indipendente dai precedenti.

Le risposte all'impulso calcolate con *AudioConverter* (un esempio è mostrato in figura 5.8), sono caratterizzate da un buon accordo dei parametri acustici con quelli calcolati dal *Viewer* di *Ramsete* e da altrettanto buoni risultati quando impiegate come funzioni di trasferimento per operazioni di auralizzazione, tuttavia si rilevano alcuni difetti, di cui si riportano i più evidenti di seguito:

- nel confronto uditivo con una risposta all'impulso misurata, il risultato è di scarso realismo, dovuto alla notevole quantità di discontinuità che caratterizzano il rumore impiegato per la sintesi;
- il tracciato di un *Acoustic Quality Test* mostra un poco plausibile andamento “frastagliato” della risposta ai transienti, con tutta probabilità, anch’esso alla mancanza di continuità del segnale.

5.2.2 Un'altra strada: il *burst* sinusoidale

L'utilizzo del rumore bianco per reintegrare i dati mancanti non è certo l'unica strada percorribile, idealmente ogni segnale a banda larga e di durata sufficientemente breve potrebbe servire allo scopo; se poi tale segnale non presentasse discontinuità nel suo andamento, non si sarebbe neppure lontani dalla soluzione ottimale. Bisogna, però, scartare a priori tutti i segnali simili ad impulsi ideali, poiché, anche se continui, darebbero luogo ad un risultato acustico particolarmente scadente²¹, e siccome proprio quest'ultimo è stato fissato come primo termine di giudizio al principio di questo lavoro di sperimentazione, l'attenzione è caduta quasi da subito sui segnali sinusoidali.

Dunque l'idea alla base dell'intera costruzione sperimentale è quella di ripercorrere tutte le considerazioni teoriche descritte al paragrafo 5.2.1, ma sostituendo agli spezzoni di rumore, spezzoni di sinusoide di frequenza opportuna. La teoria si è poi concretizzata nella scrittura di un programma provvisoriamente denominato

²¹In [6] è descritta una tecnica che dovrebbe consentire la sintesi tramite impulsi ideali: in realtà il risultato è, a detta degli stessi autori, eccessivamente sintetico, per questo la coda della risposta all'impulso ottenuta deve subire ulteriori trattamenti, consistenti, per lo più, nell'aggiunta di rumore bianco, prima di assumere una aspetto più realistico. Durante questo lavoro di tesi, si è cercato di riprodurre tale tecnica, ma, oltre che molto laboriosa, non ha soddisfatto appieno le aspettative.

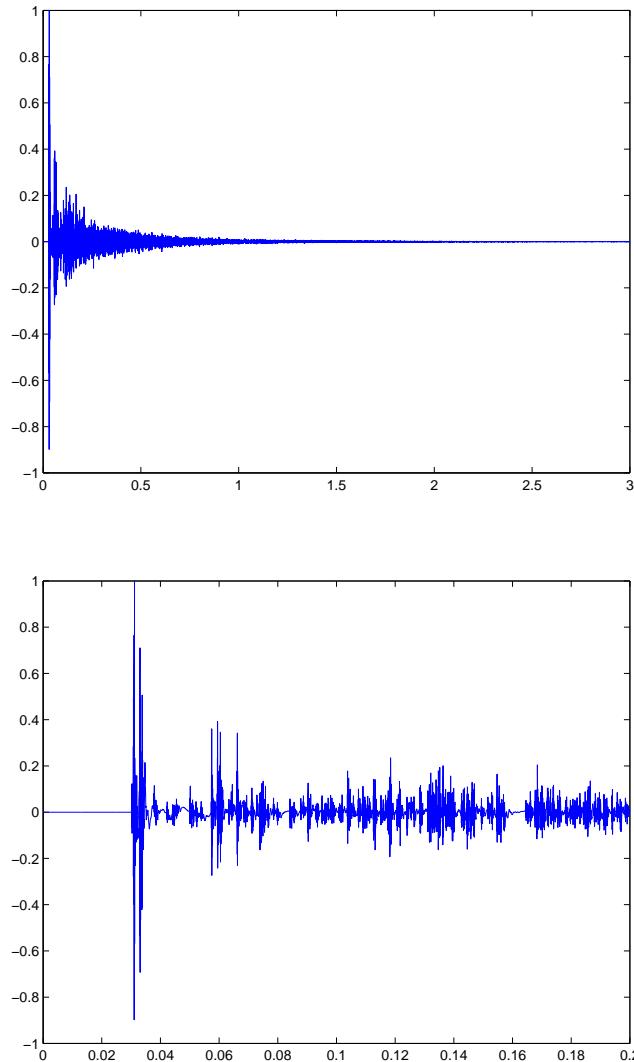


Figura 5.8: Risposta all’impulso calcolata con *AudioConverter* e dettaglio delle prime riflessioni.

getIR , il cui codice, scritto in C²², ha preso forma in ambiente Linux alla fine del mese di dicembre 2006; *getIR* vorrebbe costituire un’alternativa non esclusiva a *Rams2wav*, risolvendo il già menzionato problema dell’ “aspetto acustico”, non sempre gradevole, mediante l’adozione di segnali dall’andamento meno spigoloso. I segnali sinusoidali, però, presentano da subito un macroscopico difetto, cioè la

²²In realtà il prototipo è uno script *Matlab*, cui si è ben presto preferita l’efficienza di un linguaggio compilato dalle prestazioni elevate quale, appunto, il C.

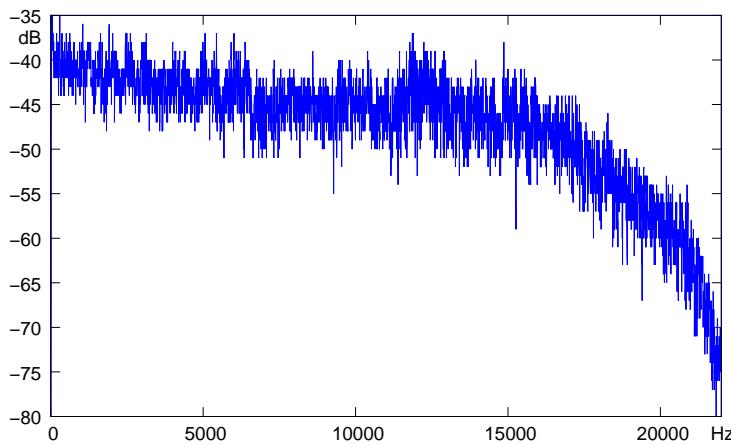


Figura 5.9: Spettro della risposta all'impulso di figura 5.8.

banda stretta e tale caratteristica è in netto contrasto con la richiesta di banda larga sopra specificata; tuttavia, se è vero che un solo segnale sinusoidale ha banda stretta, è altrettanto vero che il segnale ottenuto sommando molti segnali sinusoidali di frequenza differente avrà banda senz'altro più estesa. Questa banale constatazione ha indicato la metodologia da seguire per la costruzione dei *burst*: per ogni banda d'ottava sono state generate 12 sinusoidi le cui frequenze adiacenti hanno un rapporto pari a quello di un semitono²³, quindi ogni *burst* ad essa relativo è formato semplicemente dalla somma di queste, vale a dire che un generico campione è dato da

$$b_l[k] = \sum_{m=1}^{12} \sin(2\pi f_{m,l} k T_s + \phi_n) \quad \text{con } k \in [0, M_l], k \in \mathbb{N}. \quad (5.16)$$

L'equazione 5.16 costituisce, ora, un utile riferimento per descrivere diverse problematiche incontrate durante lo sviluppo del software: si evidenzia, per esempio, la peraltro ovvia dipendenza di f , frequenza della sinusoide, tanto dall'indice del semitono m , quanto da quello di banda l ; la scelta, poi, di assegnare fase casuale ad ogni riflessione rilevata dal ricevitore è modellata dalla variabile aleatoria ϕ_n .²⁴ Si noti, ora, un altro particolare di estrema importanza per ottenere una

²³Si rammenta che un intervallo tra due suoni, secondo il sistema d'accordatura detto *temperamento equabile*, si dice di *semitono* quando il rapporto tra le frequenze è pari a $\sqrt[12]{2}$.

²⁴Questa indicazione suggerisce un'altra ottica da cui è possibile analizzare la tecnica di

ricostruzione spettrale perlomeno sensata del segnale, ossia la dipendenza dalla banda della lunghezza del *burst* M_l ²⁵; disponendo di ecogrammi determinati con un certo periodo di campionamento T_{Ram} , l'intuizione ha inizialmente spinto ad adottare proprio T_{Ram} come lunghezza standard dei *burst*, poiché questa è la misura dello “spazio vuoto” tra un campione dell’ecogramma ed il successivo. Tale assegnamento, però, si è rapidamente rivelato, almeno in parte, sbagliato, dal momento che è possibile riscontrare una certa componente di frequenza f_i in un segnale di lunghezza finita T solamente se

$$T \geq \frac{n}{f_i} \quad \text{con } n \in \mathbb{N} - \{0\}, \quad (5.17)$$

pertanto, per $T_{\text{Ram}} = 1 \text{ ms}$ ²⁶, sono state fissate le lunghezze di *burst* riportate in tabella 5.1 dalle quali facilmente si ricava M_l .

Questo ha naturalmente portato ad un discreto aumento di complessità nell’algoritmo, in particolare si noti come, nella maggior parte dei casi, $T_l > T_{\text{Ram}}$ ²⁷, questo significa che, in corrispondenza di un unico *burst*, si trovano T_l/T_{Ram} campioni dell’ecogramma, dunque che ampiezza assegnare al segnale? La scelta è stata di tipo statistico: dati M_l campioni, l’ampiezza del *burst* ad essi relativo sarà data dal valor medio delle ampiezze dei campioni in questione, ossia

$$B_l[k] = b_l[k] \frac{2^{\frac{l-1}{2}}}{12 \cdot M_l} \sum_{n=0}^{M_l-1} \sqrt{E_l[n_0 + n]}, \quad (5.18)$$

sintesi in esame, quella, cioè della scomposizione dei suoni nel dominio della frequenza (si legga: analisi di Fourier): ogni spezzone di sinusoide può essere grossolanamente interpretato come componente dell’onda che complessivamente investe il ricevitore, una componente caratterizzata da frequenza deterministica e fase casuale.

²⁵È doveroso precisare che M_l esprime la lunghezza in termini di campioni; volendo ottenere la stessa lunghezza in secondi bisogna semplicemente moltiplicare M_l per il periodo di campionamento T_s .

²⁶Tutte le risposte all’impulso sintetizzate finora hanno ricavato i dati da simulazioni effettuate con $T_{\text{Ram}} = 1 \text{ ms}$, valore che costituisce un buon compromesso tra tempo complessivo di simulazione e minimizzazione dei dati da interpolare in fase di sintesi. Per queste ragioni si ritene non conveniente impiegare dati provenienti da ecogrammi aventi T_s superiori, dai quali è lecito attendersi risultati più scadenti.

²⁷Mentre, necessariamente, $T_l \gg T_s, \forall l$.

| Indice di banda l | f_{cb} (Hz) | Durata $burst$ T_l (ms) |
|---------------------|---------------|---------------------------|
| 1 | 31.5 | 100 |
| 2 | 63 | 50 |
| 3 | 125 | 25 |
| 4 | 250 | 12 |
| 5 | 500 | 6 |
| 6 | 1000 | 3 |
| 7 | 2000 | 2 |
| 8 | 4000 | 1 |
| 9 | 8000 | 1 |
| 10 | 16000 | 1 |

Tabella 5.1: Lunghezze di $burst$ adottate in *getIR*.

dove

$$n_0 = \left\lfloor \frac{kT_s}{T_{\text{Ram}}} \right\rfloor \quad (5.19)$$

è il primo campione (*offset*) dell'ecogramma incluso nel *burst* considerato. Si evidenzia la presenza di un fattore 12 nella 5.18, che sta ad indicare la ripartizione uniforme dell'energia sonora su tutti i *burst* generati per ogni banda d'ottava, inoltre il termine correttivo $2^{\frac{l-1}{2}}$ tiene conto del fatto che dette bande hanno larghezze doppie l'una rispetto all'altra.²⁸

Gli spezzoni B_l ottenuti mediante somma di 12 sinusoidi hanno effettivamente l'andamento continuo voluto, tuttavia nel momento in cui vengono accostati fra loro per comporre il vettore della risposta all'impulso, il problema delle discontinuità si ripresenta, come mostrato in figura 5.10; ciò è dovuto al fatto che

1. vi è una fase casuale,
2. T_l non è necessariamente un multiplo del periodo della sinusoida.

²⁸È stata introdotta anche la fondamentale correzione di coda espressa dalla relazione 4.10.

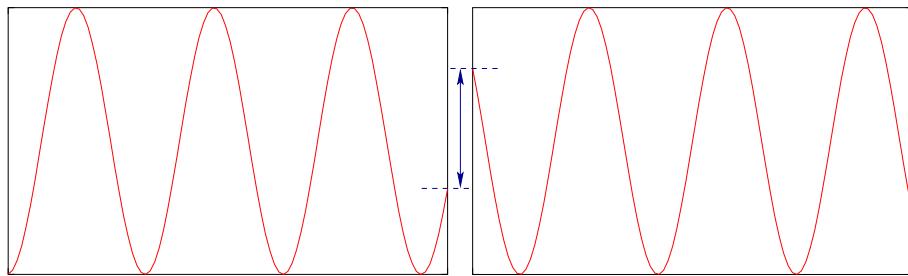


Figura 5.10: Raccordo tra due *burst* successivi.

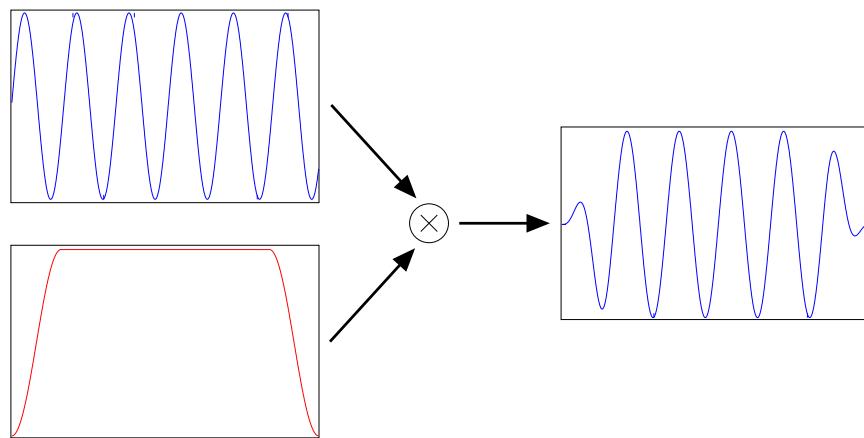


Figura 5.11: Sintesi della risposta all'impulso: processo di *finestratura* nel tempo di un *burst*.

La soluzione, questa volta, è consistita nella cosiddetta tecnica della *finestratura* applicata nel dominio del tempo ad ogni *burst*. Il filtro adottato è del tipo a coseno rialzato *flat-top*, come visibile in figura 5.11. Per evitare, infine, che nell'andamento complessivo della risposta all'impulso vi fossero degli zeri periodici dovuti allo smussamento operato dai filtri, ogni *burst* è stato sovrapposto al successivo, come illustrato nella figura 5.12, nella quale è anche schematizzato l'intero processo di sintesi della risposta all'impulso: ogni trapezio rappresenta un *burst* B_l ed ogni riga una banda d'ottava. Il risultato finale è dato dalla somma di tutte le righe.

In figura 5.13 è riportata una risposta all'impulso sintetizzata con *getIR* .

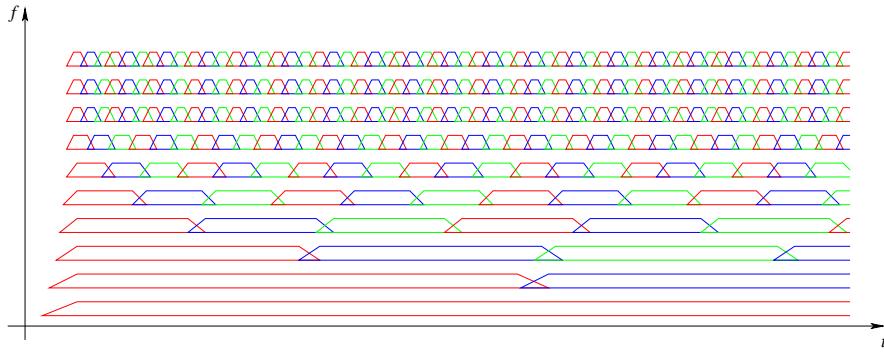


Figura 5.12: Sintesi della risposta all’impulso: processo di accostamento e sovrapposizione dei *burst*.

5.3 Sintesi multicanale

La possibilità offerta da *Ramsete* di restituire anche informazioni di tipo geometrico relative alle prime riflessioni ha reso quasi ovvia l’estensione dell’algoritmo di *getIR* a risposte all’impulso multicanale²⁹, in particolare di tipo binaurale e *B-Format*. In entrambi i casi l’intervento ha riguardato esclusivamente la prima parte, relativa alle riflessioni precoci, di ogni canale delle risposte generate come verrà descritto in dettaglio nei paragrafi successivi; la coda riverberante, invece, è stata sempre sintetizzata col metodo di cui al paragrafo 5.2.2, con l’accortezza di utilizzare generatori di numeri casuali indipendenti per ogni canale.³⁰

5.3.1 Risposte all’impulso binaurali

Il problema che sta al fondamento della sintesi di risposte all’impulso binaurali e *B-Format* consiste nel metodo per la ricostruzione delle informazioni spaziali, dal momento che, in questi casi, non conta più solamente l’intensità, ma anche la direzione di propagazione dell’onda ricevuta. Grazie alla lungimiranza dei progettisti, *Ramsete*, oltre al file di risultati contenente l’ecogramma, produce, a richiesta dell’utente, un ulteriore file (nel seguito *rays file*) nel quale vengono riportati tempo d’arrivo, energia per bande d’ottava e coordinate degli impatti per le prime riflessioni. In effetti questo è tutto ciò che occorre per generare

²⁹Un riferimento a questo proposito può essere [4].

³⁰Ciò equivale all’ipotesi di ritenere statisticamente indipendenti le code dei canali.

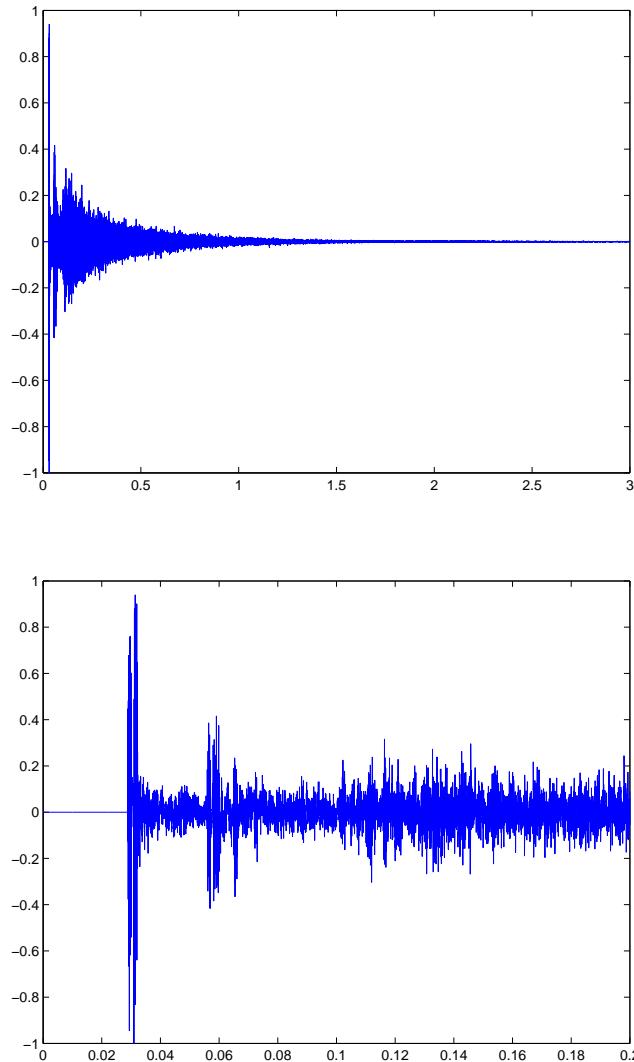


Figura 5.13: La stessa risposta all'impulso di figura 5.8 calcolata col metodo delle sinusoidi e dettaglio delle prime riflessioni.

una risposta all'impulso caratterizzata spazialmente, ciò che resta da chiarire è quale sia la porzione di segnale da trattare in questo senso; la risposta, ancora una volta, viene da considerazioni di carattere psicoacustico, in base alle quali si è osservato come le informazioni spaziali realmente recepite dall'orecchio umano siano contenute, più o meno, nei primi 80 ms della risposta all'impulso.³¹

³¹Quasi superfluo aggiungere che questo intervallo di tempo è riferito sempre all'onda diretta.

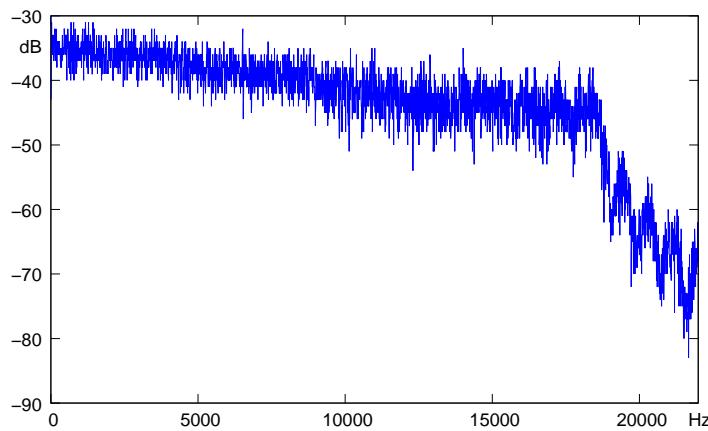


Figura 5.14: Spettro della risposta all’impulso di figura 5.13.

La procedura seguita per la sintesi di risposte all’impulso binaurali è, quindi, macroscopicamente suddivisa in due passi

1. sintesi della *testa*, ossia dei primi 80 ms,
2. sintesi della coda riverberante

dei quali il secondo è già stato ampiamente trattato, pertanto non vi verranno spese ulteriori parole; per quanto riguarda la sintesi della parte iniziale, invece, è stato seguito un metodo riferentesi direttamente alle tecniche di *Head Tracking* di cui al paragrafo 5.1.2. Più nel dettaglio, per ogni dato contenuto nel *rays file* il cui tempo di arrivo t_i sia inferiore ad 80 ms, vengono eseguite le seguenti operazioni:

- generazione di una risposta all’impulso ideale con δ all’istante t_i ;
- filtraggio grossolano del segnale precedente con le informazioni in bande d’ottava del *rays file* ad esso relative;
- calcolo degli angoli d’arrivo del fronte d’onda³²;
- filtraggio ulteriore con il segnale *HRTF* relativo agli angoli calcolati al punto precedente.

³²Si tratta dei consueti angoli di azimuth ed elevazione.

A questo punto si saranno ottenute un insieme di risposte all'impulso binaurali³³ che, una volta sommate tutte in una nuova coppia di vettori, formeranno la *testa* della risposta cercata.

Per offrire ulteriore flessibilità d'uso all'utente, *getIR* è in grado di utilizzare insiemi di *HRTF* tali per cui ogni risposta all'impulso è salvata singolarmente in un file in formato **wav** stereo, il cui nome termina con la stringa **_T000_P000.wav**; le espressioni **T000** e **P000** indicano, rispettivamente gli angoli di azimuth ed elevazione, dove i valori **000** vanno sostituiti con gli angoli caratteristici della misura in gradi³⁴, curando di mantenere uno o due zeri davanti ai numeri di, rispettivamente due cifre o una. Tale caratteristica rende possibile l'impiego dei *set* di *HRTF* di elevata qualità realizzati presso l'*IRCAM* di Parigi all'interno del progetto *Listen*.³⁵

5.3.2 Risposte all'impulso *B-Format*

Per quanto concerne la sintesi di risposte all'impulso *B-Format*, valgono i medesimi concetti esposti per la sintesi binaurale fuorché, com'è ovvio, il filtraggio con *HRTF*; rimane, dunque, solamente da descrivere il metodo scelto per assegnare un contenuto spaziale ai canali relativi agli assi cartesiani.

L'elevata direttività che debbono necessariamente presentare i microfoni - virtuali, in questo caso - relativi ai canali *X*, *Y* e *Z* è sfruttata per rilevare solamente la componente relativa all'asse omologo dell'onda incidente; pertanto, modellando l'onda "discreta" incidente il ricevitore come un vettore \vec{I} , avente per modulo il pacchetto energetico calcolato da *Ramsete* per quella singola riflessione e per direzione la normale al fronte d'onda³⁶, allora l'ampiezza da assegnare ad ognuno dei summenzionati canali sarà data dalla scomposizione di \vec{I} lungo gli assi di un

³³Le *HRTF* sono già segnali binaurali.

³⁴Al momento la risoluzione di misura ipotizzata è di 15°, ciò significa che tutti gli angoli calcolati con i dati del *rays file* vengono approssimati al più vicino multiplo di 15; se non esiste un file con tale angolo, ne viene cercato un altro aumentando o diminuendo il valore di 15°.

³⁵Si tratta di un progetto attivato nel 2002 avente come obiettivo la sperimentazione e la fruizione da parte di utenti esterni di sistemi *Head Tracking* con riproduzione binaurale: all'interno di esso è stato preparato, nel corso degli anni, un cospicuo database di *HRTF* (<http://recherches.ircam.fr/equipes/salles/listen/index.html>)

³⁶Cioè la retta congiungente il punto dell'ultimo impatto ed il ricevitore.

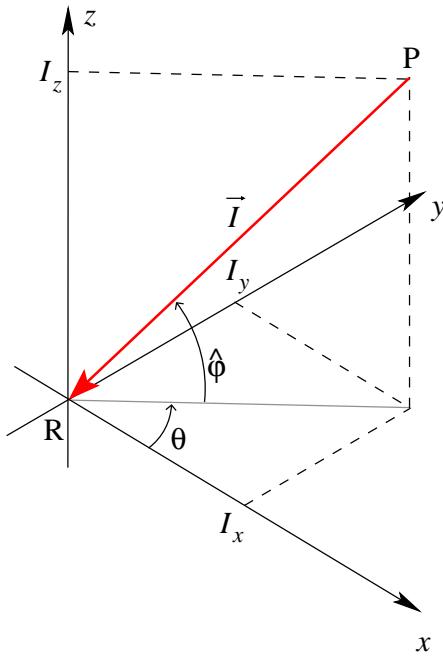


Figura 5.15: Scomposizione del vettore \vec{I} lungo le tre direzioni.

sistema di riferimento cartesiano la cui origine coincide col ricettore (figura 5.15, in cui ‘P’ è il punto dell’ultimo impatto ed ‘R’ il ricevitore.).

Ogni riflessione, quindi, prima di essere sommata alle altre per ottenere la *testa* del segnale, viene moltiplicata per uno dei seguenti fattori:

$$I_X = \cos \hat{\phi}_i \cos \theta_i \quad (5.20)$$

$$I_Y = \cos \hat{\phi}_i \sin \theta_i \quad (5.21)$$

$$I_Z = \sin \hat{\phi}_i \quad (5.22)$$

a seconda del canale che si sta calcolando. Nelle 5.20, 5.21 e 5.22 si è indicato con θ_i l’angolo di azimuth e con $\hat{\phi}_i$ ³⁷ quello di elevazione relativi alla riflessione

³⁷Con un poco di pedanteria, l’angolo di elevazione è stato così contrassegnato per distinguerlo da quello adottato nelle coordinate sferiche standard (ISO 31-11), codificato con ϕ e denominato *zenith*. La differenza sta nel verso di rotazione, ossia, in formule:

$$\hat{\phi} = \frac{\pi}{2} - \phi.$$

i-esima.

Il canale W , invece, essendo omnidirezionale, viene calcolato per intero secondo il metodo descritto al capitolo 5.2.2, così come le code riverberanti dei segnali X , Y e W ; tuttavia, anche in questi casi è necessario applicare dei fattori correttivi: secondo lo standard per i segnali *B-Format* l'ampiezza dell'intero canale W va infatti ridotta di 3 dB rispetto ai valori reali, infine per quanto riguarda gli altri tre canali la correzione è di un fattore $1/\sqrt{3}$. Ciò è dovuto al fatto che nella coda tardo-riverberante, quando il campo è ormai completamente diffuso, energia cinetica ed energia potenziale sono in media uguali. Ragionando per similitudini, si può affermare che la prima è proporzionale a $|v|^2$, ossia a $X^2 + Y^2 + Z^2$, mentre la seconda a W^2 ed affinché queste due espressioni possano essere egualiate anche nel caso di segnali sintetizzati, bisogna introdurre il fattore di cui sopra.

L'algoritmo di calcolo della *testa* della risposta all'impulso mediante i dati del *rays file* è stato esteso anche alla sintesi di risposte monoaurali, dal momento che spesso è fondamentale essere in grado di stabilire relazioni di fase tra le riflessioni precoci; non sono infatti rari i casi in cui nel processo di auralizzazione si debbono ricostruire anche fenomeni di interferenza fra onde oppure di risonanza nel punto dell'ambiente allo studio.

Nelle risposte all'impulso sintetizzate in quest'ultimo modo, però, ritorna il problema dell'eccessiva sinteticità, questa volta, della parte iniziale, dovuta all'utilizzo degli impulsi ideali per modellare le riflessioni³⁸; per questa ragione, in via sperimentale, è stata introdotta la possibilità di adottare un qualsiasi impulso per tale operazione, è sufficiente che questo sia stato salvato in formato **wav**.

La definizione è analoga a quella della *longitudine* δ del sistema di coordinate geografiche riportate nella medesima norma.

³⁸Effettivamente tale problema è praticamente assente nell'algoritmo binaurale, per via del filtraggio con impulsi reali quali le *HRTF*.

5.4 Alcuni risultati

Se gli obiettivi di buona qualità all’ascolto e flessibilità di utilizzo si ritengono, tutto sommato, raggiunti, il calcolo dei parametri acustici³⁹ compiuto su un campione di 13 risposte all’impulso generate a partire da 5 risultati di simulazione ha evidenziato alcune non trascurabili lacune che ancora affliggono il programma. In particolare, nelle figure 5.16 e 5.17 sono riportati gli errori medi calcolati rispetto ai valori prodotti dal software *View* di *Ramsete*, presi come riferimento, dai quali si evince un generale sbilanciamento nel rapporto tra l’energia associata alle riflessioni precoci e quella, invece, associata alla coda riverberante. Con tutta probabilità i *burst* sinusoidali impiegati contengono più energia di quanta ci si aspetti e questo può essere dovuto a:

1. eccessiva lunghezza rispetto al segmento temporale che essi rappresentano;
2. estensione dello spettro di ogni *burst* all’esterno dell’ottava in cui il tono puro dovrebbe essere collocato per via del troncamento agli estremi;
3. valore RMS di un singolo *burst* superiore a quello di uno spezzone di rumore bianco della medesima durata.

³⁹Avvenuto tramite il modulo *Acoustic Parameters 4.0* di *Aurora*, suite di plug-in per il software *Adobe Audition* scritti da A.Farina.

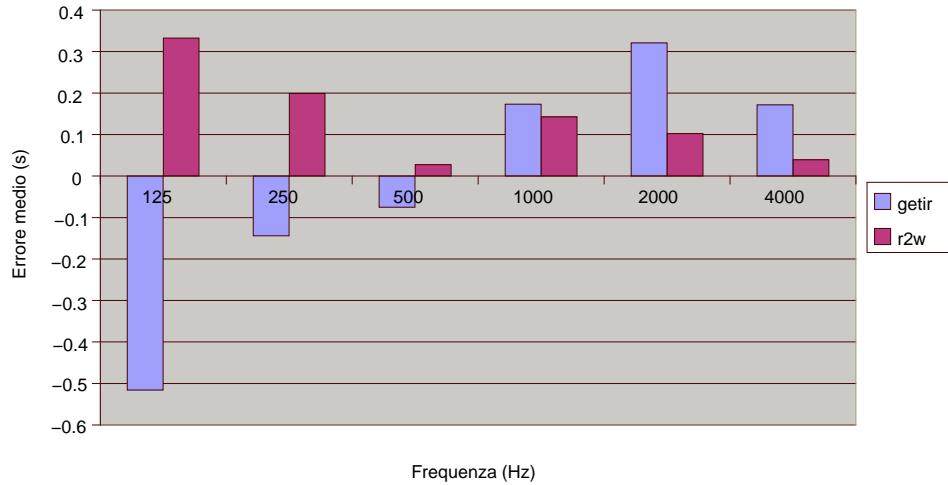


Figura 5.16: T_{20} : confronto tra *getIR* e *Audio Converter*, errori medi per banda (riferimento *Ramsete View*).

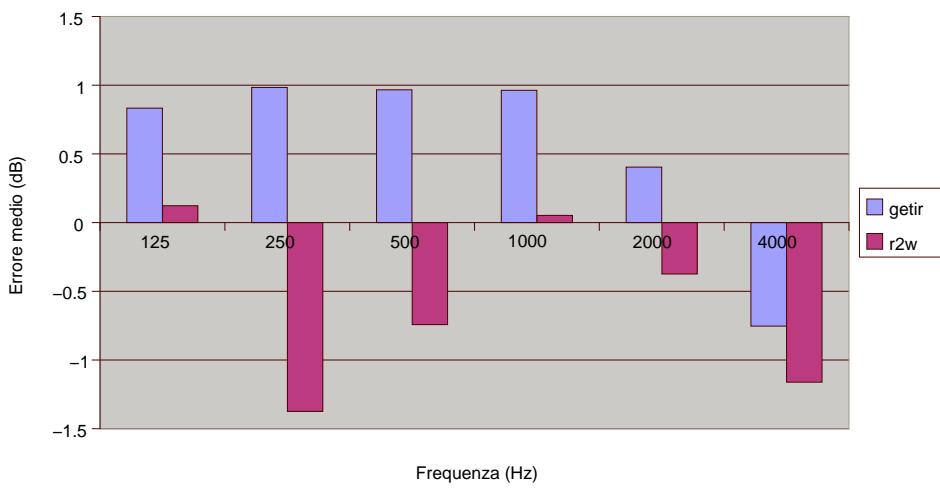


Figura 5.17: C_{80} : confronto tra *getIR* e *Audio Converter*, errori medi per banda (riferimento *Ramsete View*).

Capitolo 6

Casi di studio

Verrà ora descritta l'applicazione delle tecniche di simulazione acustica di cui al capitolo 4 a due casi concreti molto differenti tra loro: l'abitacolo di un automobile ed una chiesa. In particolare saranno illustrate le finalità dei due lavori, il metodo che ha portato all'ottenimento di un modello acustico affidabile, le scelte progettuali ed infine i risultati.

6.1 L'abitacolo di un'autovettura

L'impiego di un *beam tracer* come *Ramsete* per la simulazione acustica di un abitacolo di automobile può sembrare un evidente controsenso: le dimensioni medie di un simile ambiente sono tali per cui la condizione 4.1 viene disattesa in una buona parte dello spettro audio. Ne rimane, tuttavia, una ben più ampia porzione, costituita dalle frequenze medio-alte, nella quale la 4.1 torna ad essere rispettata e pertanto la modellazione del comportamento acustico tramite il metodo geometrico non è più un'ipotesi da scartare a priori. Potrebbe allora essere conveniente, da un punto di vista computazionale, applicare la descrizione rigorosa della propagazione delle onde, espressa dalle equazioni di d'Alembert, per le basse frequenze, ed adottare, invece, l'approssimazione geometrica alle alte.

Durante questo lavoro di tesi si è, appunto, partecipato ad una sperimentazione di questo genere, volta a valutare la qualità dei risultati ottenibili mediante una modellazione acustica *ibrida*, facente uso di simulazioni col metodo degli ele-

menti finiti per frequenze fino a 500 Hz e di *Ramsete* per il resto della banda udibile¹, come illustrato dal diagramma di figura 6.1. Nella fattispecie ci si è occupati soltanto di queste ultime.

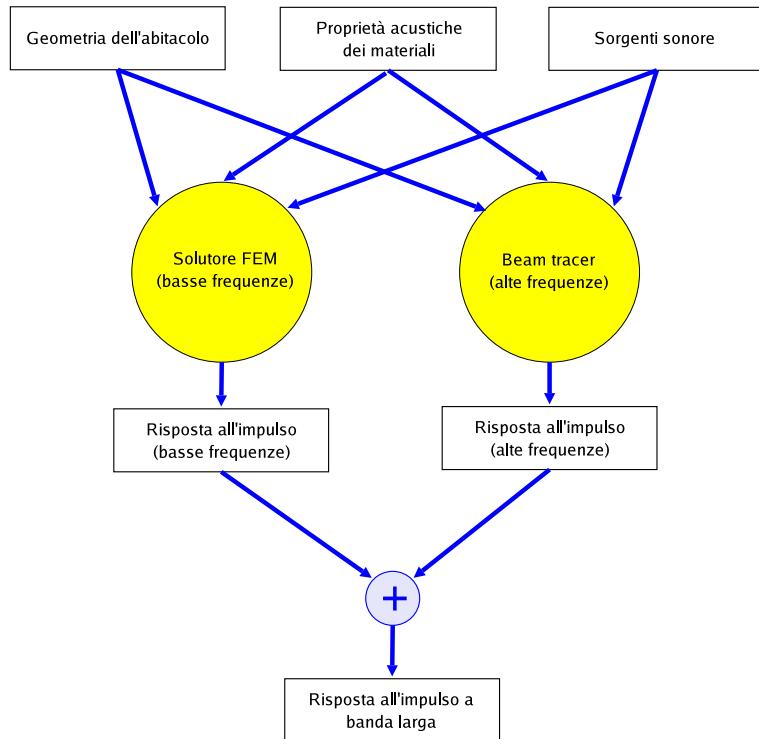


Figura 6.1: Diagramma di flusso del processo ibrido di sintesi di risposte all'impulso.

Primo passo da compiere nell'approccio alla simulazione acustica con *Ramsete* è la taratura del modello; la casa costruttrice, infatti, ha fornito i disegni tridimensionali degli interni dell'auto² (figura 6.2), dunque non è stato necessa-

¹Il tutto si inserisce nel più ampio progetto di realizzazione di un impianto audio per tale vettura da parte dell'azienda *ASK Group* di Reggio Emilia

²Il modello fornito, in realtà, era caratterizzato da una complessità geometrica troppo elevata, inutile ai fini di una simulazione di tipo acustico sia per quanto riguarda algoritmi ad elementi finiti che *beam-tracer* (per ragioni differenti). Si ha pertanto dovuto procedere preventivamente alla drastica semplificazione del modello stesso.

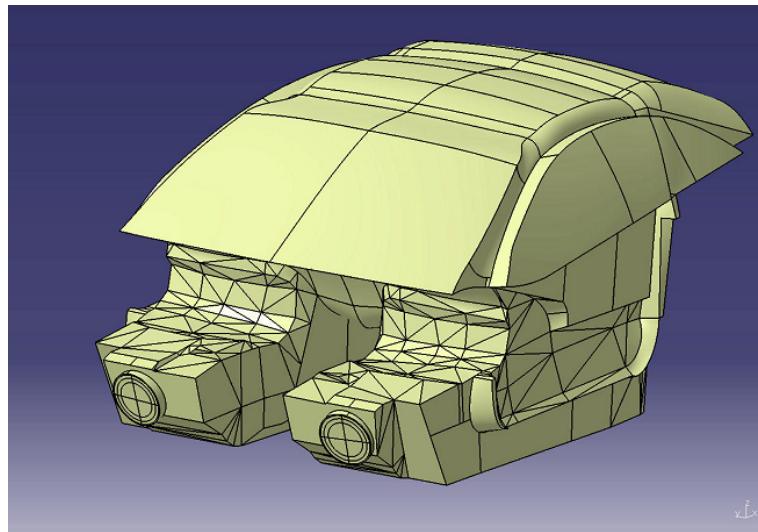


Figura 6.2: Modello tridimensionale dell'abitacolo.

rio procedere alla descrizione geometrica dell'abitacolo. La taratura, però, deve essere preceduta dalla definizione di:

- materiali delle superfici,
- sorgenti,
- ricevitori,

altrimenti questa non sarà affidabile.

In generale i materiali adottati per la costruzione ed il rivestimento degli elementi di un abitacolo sono numerosi e, spesso, dalle più varie caratteristiche acustiche; questo caso particolare non fa, naturalmente, eccezione, soltanto, trattandosi di una vettura sportiva di lusso, cambiano le tipologie. Purtuttavia, non si è ritenuto necessario specificare dettagliatamente per ogni superficie un materiale diverso, più o meno corrispondente a quello reale, e questo per almeno due ragioni:

1. non erano noti i parametri acustici dei materiali³;

³Era stata misurata con cura solo l'impedenza acustica da chi si è occupato delle simulazioni ad elementi finiti, dunque tali misure erano state condotte solo nella banda d'interesse, 20-500 Hz.

2. l'approssimazione dovuta all'utilizzo di un materiale avente proprietà assorbenti medie tra tutti quelli presenti è spesso più che soddisfacente, pertanto i materiali adottati sono stati due, uno con bassi coefficienti di assorbimento per le superfici vetrate ed uno, più generico, per tutte le altre.

Per quanto riguarda le sorgenti da utilizzare, la questione era ancora più delicata: infatti le misure di risposta all'impulso che sarebbero servite da riferimento per la taratura, sono state realizzate utilizzando gli altoparlanti dell'impianto audio dell'automobile come sorgenti, quindi era importante disporre nel modello *Ramsete* di sorgenti aventi risposta in frequenza e diagramma di direttività il più possibile simile a quelle reali. Purtroppo non è stato possibile ottenere tali diagrammi, quindi si è dovuto ripiegare su ragionevoli approssimazioni degli stessi, compiute considerando che si trattava di due coppie *mid-woofer/tweeter* per uso *automotive*⁴, con le le rispettive limitazioni di banda.

I ricevitori disponibili in *Ramsete*, infine, sono solo di tipo omnidirezionale, cosa che, nel caso in esame, non ha costituito un problema, poiché le misure di riferimento furono effettuate con microfoni anch'essi omnidirezionali; l'unico dettaglio cui prestare attenzione era la collocazione dei ricevitori, che doveva essere replicata nel modello.

Una volta fissati materiali, sorgenti e ricettori, si è proceduto con la taratura vera e propria, ossia, una volta preso un parametro di riferimento dalle risposte all'impulso misurate, si compie una simulazione e si valutano le discrepanze col parametro in questione: se sono rilevanti, si interviene sui coefficienti di assorbimento di uno o più materiali nelle bande d'interesse, quindi si riparte daccapo.⁵ In questo caso la taratura è avvenuta riferendosi alla media per ogni banda dei valori di T_{30} relativi alle misure compiute.⁶

⁴La cui direttività ha diagrammi polari quasi emisferici alle frequenze medio-alte.

⁵In realtà, per semplificare il processo, senza, peraltro, inficiare i risultati, il materiale di cui si correggono le proprietà è uno soltanto, cioè quello caratterizzato da un coefficiente d'assorbimento *medio* al quale si faceva riferimento poco sopra.

⁶Si evidenzia che, in questa circostanza, la denominazione "tempo di riverbero" assume uno

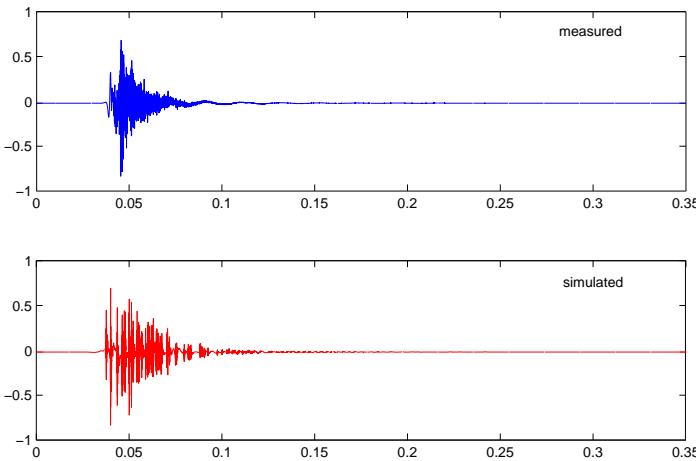


Figura 6.3: Risposte all’impulso misurata e simulata.

Completata la procedura, sono state preparate 8 risposte all’impulso sintetiche mediante *AudioConverter* equivalenti a quelle misurate, cioè 4, relative a ciascun altoparlante, per ogni ricevitore; esternamente al presente lavoro dette risposte sono state sommate a quelle prodotte con la simulazione ad elementi finiti, così da ricavare i segnali a banda larga desiderati. La figura 6.3 riporta il confronto visivo tra una risposta all’impulso misurata ed una sintetizzata con la tecnica di cui sopra, mentre in figura 6.4 sono rappresentati gli spettri: è evidente il buon accordo ottenuto, in particolare in quest’ultimo caso, dunque i limiti intrinseci degli algoritmi di *beam-tracing* nell’approccio ad ambienti di piccole dimensioni possono essere efficacemente compensati, con lo svantaggio, però, della maggior laboriosità dell’intero processo.

6.2 La chiesa di San Vitale

Ben diverso dal precedente è il caso che ci si accinge ora a descrivere. La chiesa di San Vitale è un edificio sito in Parma in via Repubblica (figura 6.5), la cui costruzione iniziò nel 1651 per terminare sette anni più tardi, come ricordato dalla lapide posta sulla controfacciata; esso costituisce un luminoso esempio di

scarso significato, poiché nell’ambiente allo studio non vi è una vera coda riverberante; ha più senso parlare di “tempo di decadimento”.

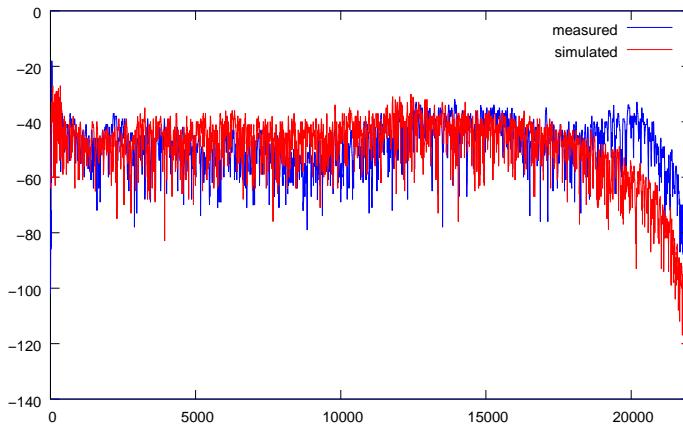


Figura 6.4: Spettri delle risposte all’impulso misurata e simulata.

architettura barocca, arricchito nel suo interno da un cospicuo numero di opere pittoriche e scultoree realizzate tra i secoli XVII e XIX, fra le quali un posto di rilevo⁷ merita senz’altro il seicentesco altare della Beata Vergine di Costantino-poli (quinta cappella a sinistra).⁸

In seguito ad un restauro durato sei anni, finalizzato alla conservazione delle opere d’arte, a rimediare ai danni provocati dal terremoto del 1996⁹ ed a consolidare le strutture murarie, nel 2005 la chiesa è stata finalmente riaperta al culto. Da subito, però, il Comune di Parma, proprietario dell’edificio, ha apertamente espresso il desiderio di impiegare quest’ambiente come sede concertistica, allo scopo di unire, così, alla soddisfazione degli occhi, per l’innegabile bellezza del patrimonio artistico ivi conservato, quella dell’udito. In particolare, la destinazione doveva essere la musica antica, intendendo con quest’accezione tutto il repertorio

⁷Chi scrive avrebbe fortemente desiderato collocare fra i tesori di questo scrigno l’organo, che fu opera di una delle più prestigiose fabbriche organarie italiane di sempre: i Serassi di Bergamo. Purtroppo due disgraziati interventi, nel 1964 prima e nel 1986 poi, ed il recente, discutibile, restauro, tutto fecero fuorché valorizzarne le antiche qualità sonore, delle quali il nome *Serassi* era garanzia. Non è più dunque possibile parlare di *organo Serassi*, ma di uno dei tanti strumenti dalla scarsa personalità e dalla timbrica mediamente infelice che popolano le chiese d’Italia.

⁸Per le notizie storiche e relative al restauro un valido riferimento è [2].

⁹In seguito a questa scossa sismica la chiesa fu dichiarata inagibile.



Figura 6.5: Facciata della chiesa di San Vitale in Parma.

antecedente la seconda metà del secolo XVIII, essendo già fruibili in città luoghi adatti al concertismo sinfonico ed alla musica romantica in genere.

Con i termini generici “musica antica”, però, si identificano d’abitudine una pluralità di generi musicali¹⁰ che vanno dalla musica corale a quella concepita ed eseguita, al tempo, in locali di ridotte dimensioni; mentre nel primo caso i parametri acustici di una chiesa (si veda la tabella 2.1) potrebbero risultare adeguati, nel secondo certamente non lo saranno ed il rischio concreto è di proporre con-

¹⁰Tale considerazione è applicabile ad una buona parte di quelle “etichette” con le quali è prassi comune incasellare la musica - per non far torto ad alcuno - *non popolare*, tra cui emerge l’abusata quanto impropria “musica classica”. La realtà, grazie al cielo, è molto più sfaccettata e complessa. Ad un progettista, tuttavia, occorrono di norma solidi punti di riferimento piuttosto che dissertazioni filosofiche, ed uno di questi sono le dimensioni delle compagnie orchestrali e corali le quali, mediamente, nel corso dei secoli aumentano.

certi in cui già gli ascoltatori seduti al centro della sala hanno una percezione assolutamente scadente dell'esecuzione, per esempio, di un piccolo *ensemble* di strumenti ad arco.

Per tali ragioni è stata richiesta una perizia ed un progetto preliminare di *correzione* acustica del locale, ponendo come vincoli invalicabili l'adozione di strutture rimovibili e l'assenza di interventi di alcun genere sugli elementi architettonici della chiesa.

Punto di partenza del presente lavoro, quindi, sono state le misure compiute nel luglio 2006 con la tecnica dello sparo di pistola a salve, mentre lo svolgimento della progettazione tramite *Ramsete*¹¹ ha seguito i seguenti passi:

1. disegno del modello;
2. taratura del modello;
3. ideazione di strutture acusticamente correttive;
4. confronto tra le medesime;

la scelta finale è spettata al committente, al quale sono stati illustrati pregi e limiti delle varie soluzioni proposte.

6.2.1 Disegno e taratura

La descrizione geometrica delle superfici interne che consente una simulazione acustica dai risultati affidabili non è certamente quella più minuziosa; al contrario disegnare una quantità eccessiva di dettagli, oltre che essere molto dispendioso in termini di tempo, non produce risultati significativamente differenti da quelli ottenibili con un modello più sobrio, a maggior ragione se le dimensioni dell'ambiente non sono propriamente contenute. Questa regola ha guidato l'elaborazione del modello geometrico visibile nelle figure 6.6 e 6.7, nel quale si è curata l'esattezza delle proporzioni, ma manca completamente la profusione ornamentale presente nell'ambiente reale.

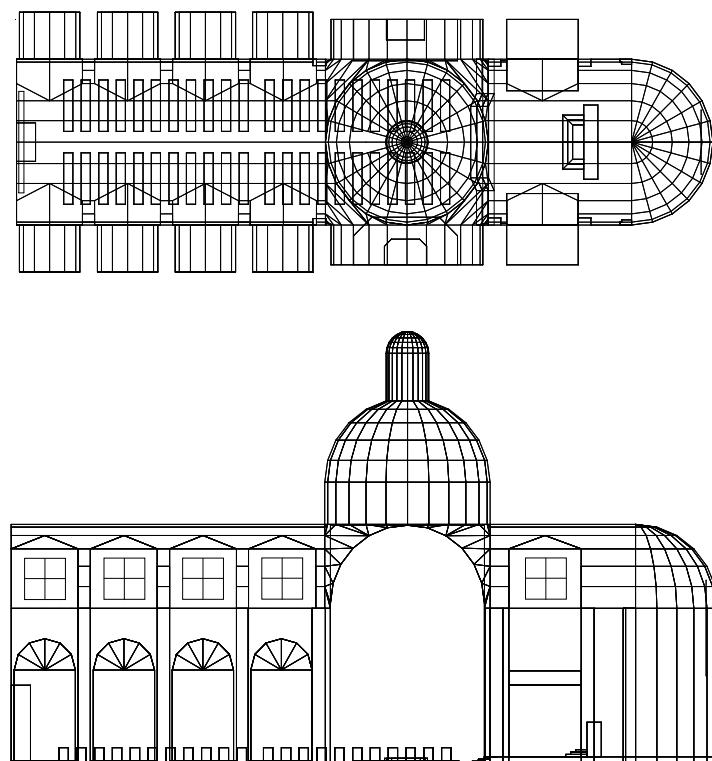


Figura 6.6: *Stato di fatto*: Pianta e sezione del modello tridimensionale.

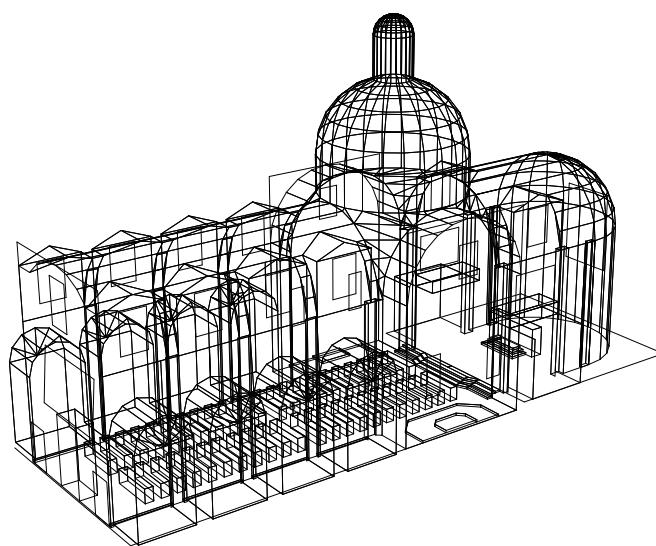


Figura 6.7: *Stato di fatto*: vista del modello tridimensionale.

La taratura è avvenuta in maniera assolutamente conforme a quanto descritto nel corso del paragrafo 6.1: anche in questa circostanza della grande varietà di materiali presenti si è scelto di impiegare solo quelli aventi la maggior estensione superficiale, quindi il legno, un unico tipo d'intonaco per pareti e soffitto ed il pavimento¹², distinto dal precedente perché acusticamente meno assorbente, trattandosi di marmo.

Si è quindi riprodotta la disposizione sorgenti/ricevitori adottata in sede di misura e si ha proceduto variando i coefficienti di assorbimento di intonaco e, in minima parte, pavimento; il parametro di riferimento è stato il tempo di riverbero T_{20} .

6.2.2 La correzione acustica

Come visibile in tabella 6.1 il valore del tempo di riverbero allo stato di fatto si assesta mediamente su valori buoni per la musica d'organo o corale, ma decisamente scarsi per tutto il repertorio cameristico e, in generale, quello relativo a piccoli insiemi strumentali. Gli interventi possibili, stanti i vincoli di cui sopra, sono molteplici e, in sede di progetto, si è preferito studiarne alcuni e valutarne gli effetti; la struttura che si ritiene irrinunciabile in una simile situazione, in cui vi sono grosse dispersioni di energia sonora alle spalle degli esecutori, è la cosiddetta *camera d'orchestra*. Essa consiste in tre vere e proprie pareti collocate dietro e di fianco ai musicisti, avente lo scopo di reindirizzare le onde sonore, altrimenti dirette verso la zona posteriore della sala, verso il pubblico; per questo motivo i pannelli generalmente utilizzati per allestire simili strutture sono in legno dalle buone proprietà riflettenti ed hanno superficie convessa, così da operare una migliore diffusione dell'energia sonora. Tali camere, nella maggioranza dei casi, sono dotate di soffitto, realizzato con pannelli convessi allo stesso modo delle pareti: esso, oltre che funzionare da superficie diffondente per il pubblico, ha l'importante scopo di contribuire a migliorare la percezione, da parte dei musicisti, del proprio e degli altri strumenti. Per ottimizzare ulteriormente la diffusione delle

¹¹In un ambiente siffatto, la condizione 4.1 è ampiamente attesa in tutte le bande.

¹²Come visibile dalle figure è stata disegnata anche la tela posta sopra la bussola d'ingresso, poiché, date le dimensioni rilevanti, si ritiene che possa avere un qualche benefico effetto di riflessione delle onde verso l'uditore. Il materiale assegnato non è naturalmente né legno, né intonaco, ma congruente con quello reale.

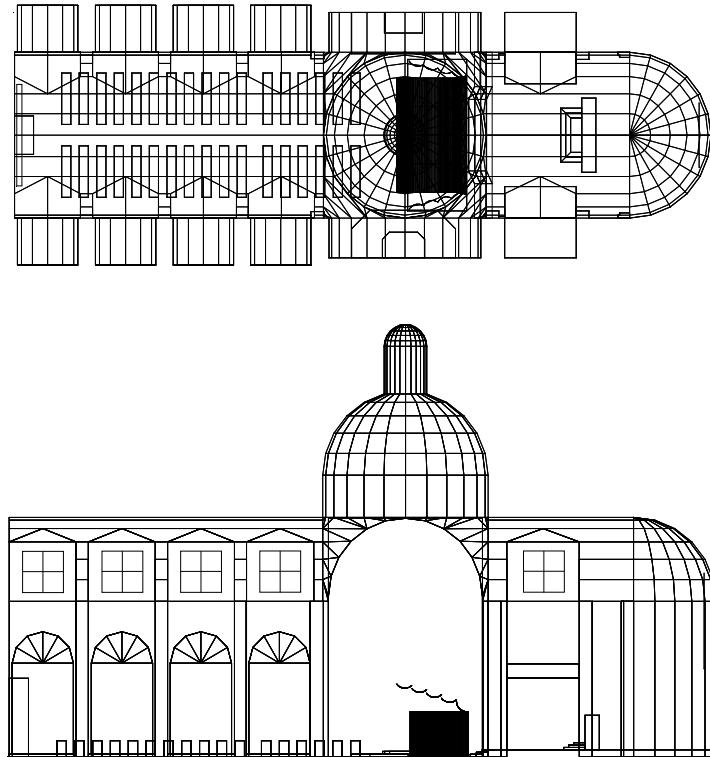


Figura 6.8: *Stato di progetto 1*: la sola camera in posizione arretrata.

onde sonore, pareti laterali e soffitto hanno andamento divergente, dal fondo verso il boccascena, sovente non lineare.¹³

Dunque le prime proposte progettuali, identificate nel seguito come *Stati di Progetto* (SdP) 1 e 2, prevedono proprio la sola collocazione di una camera d'orchestra di larghezza, profondità ed altezza adeguate ad ospitare un gruppo cameristico; tale situazione è visibile nelle figure 6.8 e 6.9, mentre i risultati delle simulazioni sono riportati nella tabella 6.1.

L'obiettivo teorico¹⁴ che si era prefissato in un valore di T_{20} nell'ordine di 2.5 s a 500 Hz, non è stato raggiunto, ma dal raffronto delle due soluzioni è già possibile dedurre almeno un'importante indicazione: più la camera è arretrata rispetto

¹³L'analogia è con le campane degli strumenti a fiato quali la tromba, il corno francese e gli ottoni in genere: lo scopo è il medesimo.

¹⁴Fornito dalla figura 2.3, una volta nota la cubatura. La chiesa in questione ha un volume interno di circa 11000 m³.

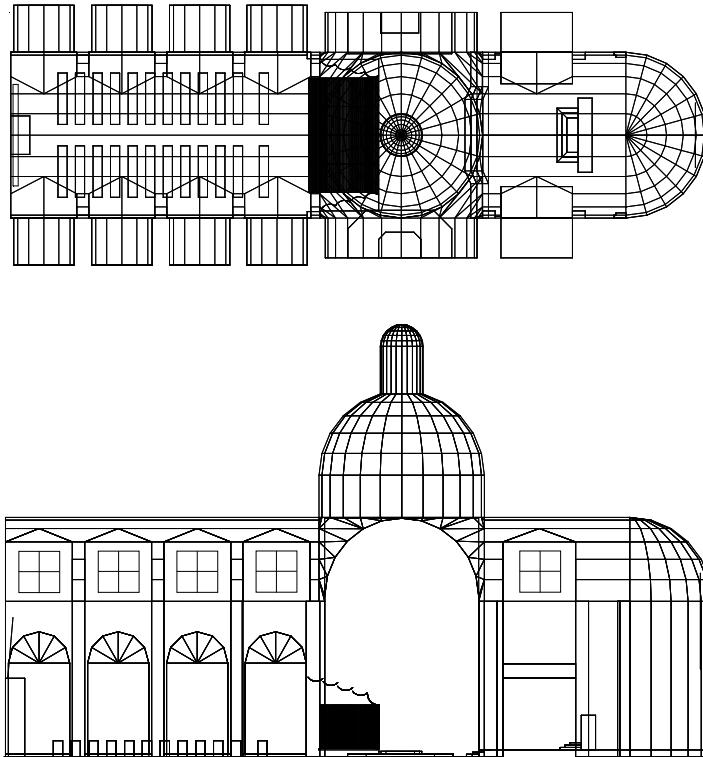


Figura 6.9: *Stato di progetto 2*: la sola camera in posizione più avanzata.

alla cupola, più sono pregiudicate le prestazioni acustiche. Ciò non fa altro che confermare un'evidenza conстатата da tutti coloro che hanno avuto occasione di eseguire musica in ambienti dotati di una o più cupole, infatti la forma circa emisferica delle volte di queste ultime è causa del fenomeno di focalizzazione dell'energia sonora riflessa, la quale invece di ritornare verso l'uditario, si concentra in un unico punto, solitamente a parecchi metri dal pavimento. L'effetto è quello di una carenza di onde dirette, come visibile dal confronto tra le mappe¹⁵ del L_{eq} ¹⁶ riportate alle figure 6.11 e 6.12: nel secondo caso, l'area colorata in tonalità di

¹⁵Si rammenta che, a differenza del tempo di riverbero, i descrittori acustici e nondimeno il *Sound Pressure Level* (leggi: *L_{eq}*) non sono parametri globali, ma propri di ogni punto dell'ambiente. Per ottenere, quindi, la cosiddetta “mappatura” del parametro in questione è necessario predisporre un modello all'interno del quale sia presente una matrice di ricettori tale da ricoprire tutta l'area d'interesse con passo ragionevole. Le mappe riportate in questo capitolo sono state realizzate collocando circa 200 ricevitori distanziati 1 m l'uno dagli altri.

¹⁶Sostanzialmente si tratta dell'energia associata al campo diretto.

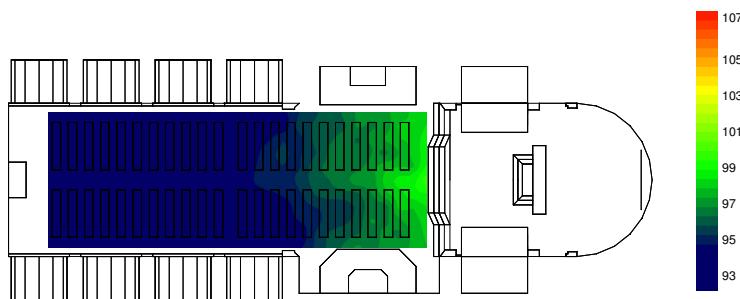


Figura 6.10: *Stato di fatto*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

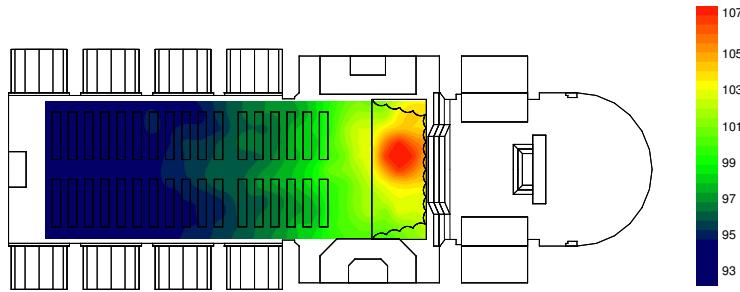


Figura 6.11: *Stato di progetto 1*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

verde è più estesa che non nel primo. A titolo di paragone si può anche osservare la ben più critica situazione di figura 6.10, in cui la mancanza di alcun genere di trattamento acustico fa sì che l’energia sonora si disperda in tutte le direzioni.

I fenomeni di cui sopra si riflettono altresì nell’indice di chiarezza C_{80} , i cui valori, visibili nelle mappe delle figure 6.13, 6.14 e 6.15, permangono in media ben al di sotto del valore di 4 dB adottato come riferimento.¹⁷

Come la cupola, un’altra delle caratteristiche strutturali critiche da un punto di vista acustico di questa chiesa sono l’altezza della navata, circa 16 m, e, in una certa misura, la forma semicilindrica della volta: se un’onda riflessa giunge all’ascoltatore con troppo ritardo, a causa del fatto che impatta contro una

¹⁷Per l’ascolto della musica sono ritenuti accettabili valori compresi tra -2 e 5 dB, come dedotto dall’analisi di svariate sale concertistiche presente in [8].

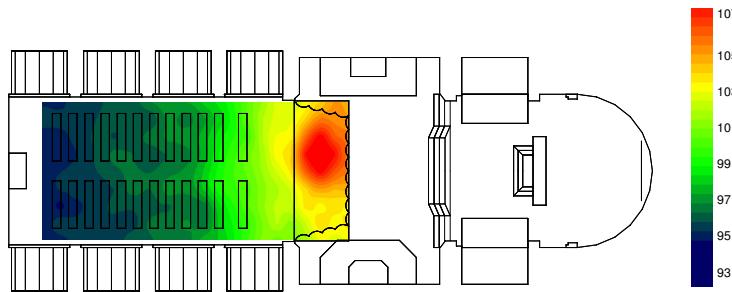


Figura 6.12: *Stato di progetto 2*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

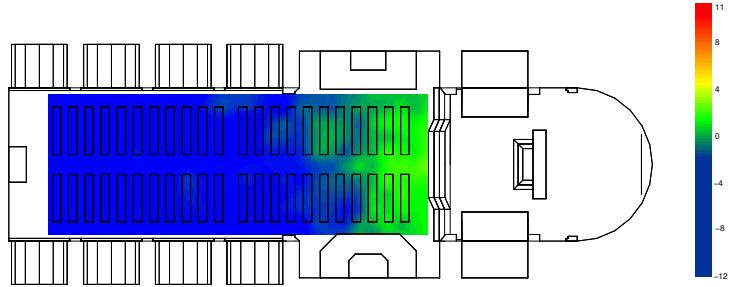


Figura 6.13: *Stato di fatto*: mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

superficie lontana come, ad esempio, un soffitto molto alto, essa andrà a sommersi non più alle riflessioni precoci, ma alla coda riverberante, aumentando il grado di “caoticità” dell’ascolto. Per quanto riguarda le forme semicilindriche valgono le stesse osservazioni relative alle cupole, essendo anch’esse possibili cause di focalizzazioni. Da qui l’idea di posizionare una controsoffittatura, magari montata su telai solidi, ma amovibili, tale da porre rimedio ai problemi di cui sopra e, in più, da funzionare come ampia superficie diffondente. Ad un ulteriore miglioramento della diffusione dell’energia sonora possono, inoltre, contribuire delle pareti posticce collocate in corrispondenza delle cappelle laterali. Tali allestimenti sono visibili nelle figure 6.16 e 6.17 e una loro eventuale realizzazione prevederebbe l’impiego dei medesimi pannelli utilizzati per la camera d’orchestra.

La tabella 6.1 evidenzia un buon miglioramento rispetto agli SdP 1 e 2; anche dalle mappe del L_{eq} (figure 6.18 e 6.19) si nota chiaramente la migliore distri-

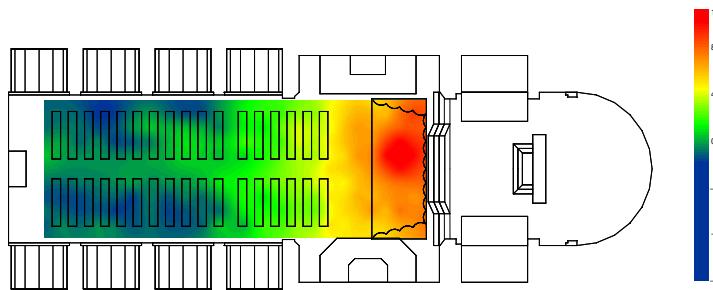


Figura 6.14: *Stato di progetto 1*: mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

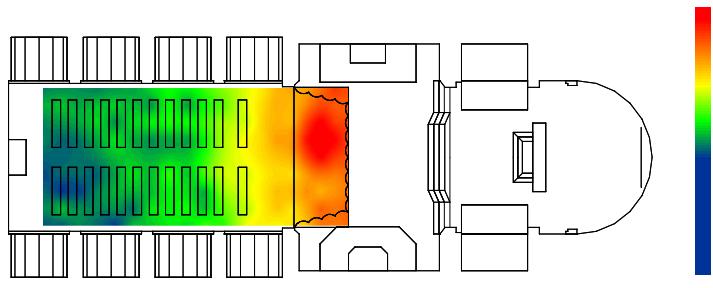


Figura 6.15: *Stato di progetto 2*: mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

buzione dell’energia sonora operata dalle superfici convesse degli allestimenti, e tutto questo si riflette in una maggior chiarezza generalmente percepita, come testimoniato dalle figure 6.20 e 6.21.

Purtroppo, nonostante i non trascurabili passi in avanti, il valore di T_{20} a 500 Hz continua a permanere al di sotto dell’obiettivo e, in effetti, le superfici aggiunte hanno scarso potere fonoassorbente, dovendo piuttosto ridistribuire l’energia. La parte posteriore dei pannelli, però, è di fatto nascosta agli occhi dei fruitori dell’ambiente ed è pertanto sfruttabile per l’applicazione di superfici acusticamente assorbenti. Lo SdP 5 riportato in tabella 6.1 si riferisce proprio alla medesima struttura dello SdP 4 trattata nel modo suddetto ed i miglioramenti in termini di tempo di riverbero sono veramente notevoli, come, d’altronde, ci si attendeva; peggiora un poco la distribuzione del campo diretto (figura 6.22), a causa del maggior potere fonoassorbente che ora caratterizza mediamente l’ambiente, mentre l’indice di chiarezza (figura 6.23) raggiunge valori che senz’altro si possono

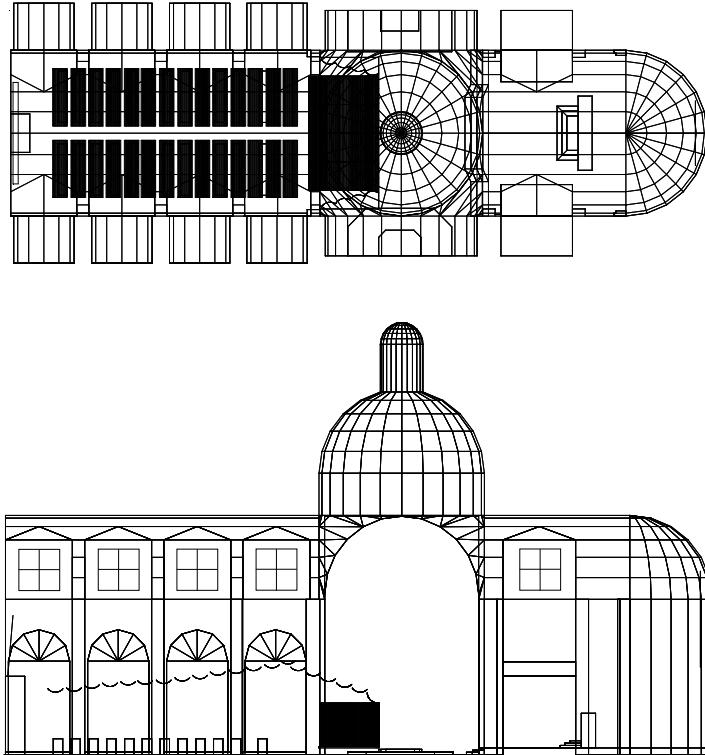


Figura 6.16: *Stato di progetto 3*: camera e pannellatura a soffitto.

definire ottimi.

Efficace sintesi del lavoro svolto è offerta dai grafici delle figure 6.24, 6.25 e 6.26, in cui è possibile confrontare i valori di tempo di riverbero ritenuti massimi per particolari utilizzi dell'ambiente in esame.¹⁸

Un'ultima osservazione riguardo l'indice C_{80} : si noti come i valori medi all'interno della camera si mantengano particolarmente elevati in tutti gli stati di progetto presentati, in perfetto accordo con le normali richieste da parte degli strumentisti.

6.2.3 Il progetto scelto

Gli obiettivi in termini di chiarezza e tempo di riverbero sono stati, almeno a livello di simulazione, raggiunti, tuttavia gli allestimenti aventi le prestazioni acustiche

¹⁸Il riferimento è la cubatura.

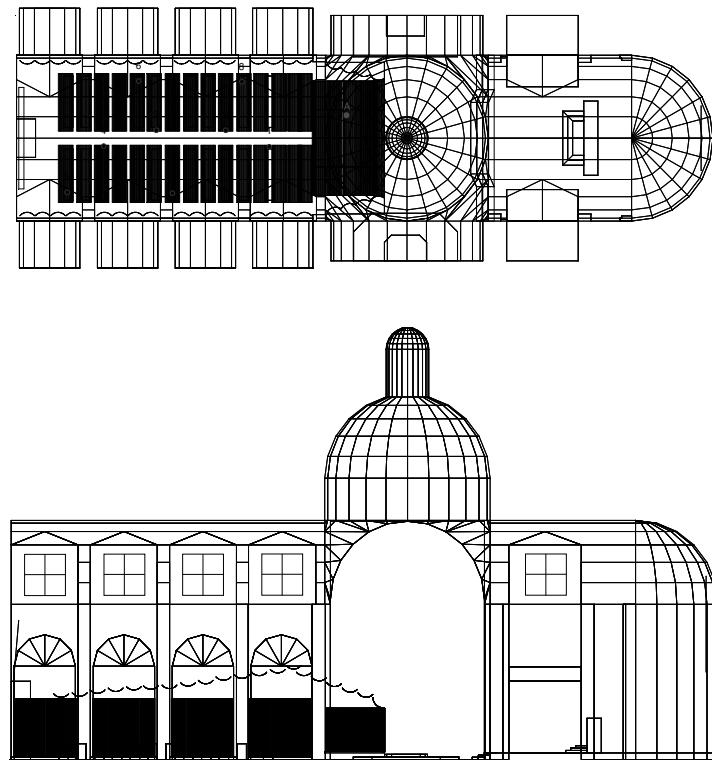


Figura 6.17: *Stato di progetto 4*: camera, pannellatura laterale ed a soffitto.

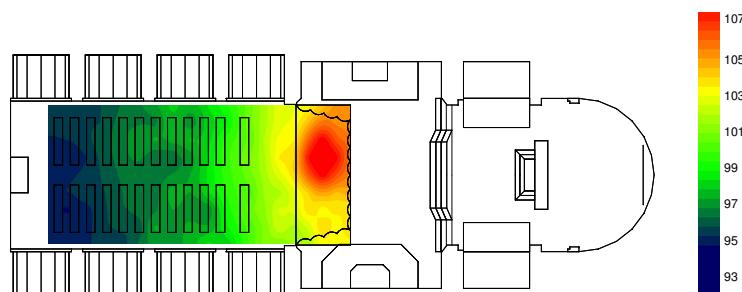


Figura 6.18: *Stato di progetto 3*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

migliori hanno un impatto visivo tutt’altro che indifferente; la ricostruzione di figura 6.27¹⁹ mostra letteralmente la “sparizione” della chiesa e la comparsa di un nuovo ambiente scarsamente relazionato al primo.

¹⁹Per la quale si ringrazia l’arch. Federica Cervini.

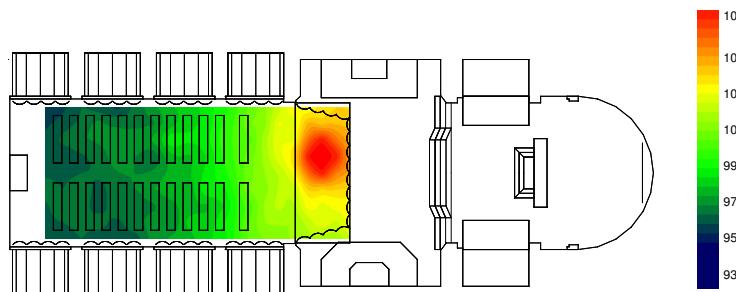


Figura 6.19: *Stato di progetto 4*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).



Figura 6.20: *Stato di progetto 3*: mappa dell’indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1 \text{ kHz}$).

Il committente ha quindi deciso per una realizzazione più sobria che riconciliasse il rispetto per la bellezza artistica circostante con la qualità dell’ascolto, compromesso ritrovato in SdP 2.

L’intera camera è stata allora interamente riprogettata impiegando un pannello

| f_{cb} | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>SdF</i> | 4.76 | 4.60 | 4.34 | 4.13 | 3.74 | 2.98 | 2.02 |
| <i>SdP 1</i> | 4.21 | 4.08 | 3.87 | 3.70 | 3.35 | 2.68 | 1.77 |
| <i>SdP 2</i> | 3.96 | 3.83 | 3.61 | 3.44 | 3.11 | 2.47 | 1.61 |
| <i>SdP 3</i> | 3.50 | 3.38 | 3.19 | 3.05 | 2.75 | 2.16 | 1.32 |
| <i>SdP 4</i> | 3.29 | 3.18 | 3.01 | 2.90 | 2.60 | 2.03 | 1.22 |
| <i>SdP 5</i> | 2.31 | 2.08 | 1.90 | 1.78 | 1.66 | 1.43 | 1.00 |

Tabella 6.1: T_{20} (s): confronto tra stato di fatto e gli stati di progetto elaborati

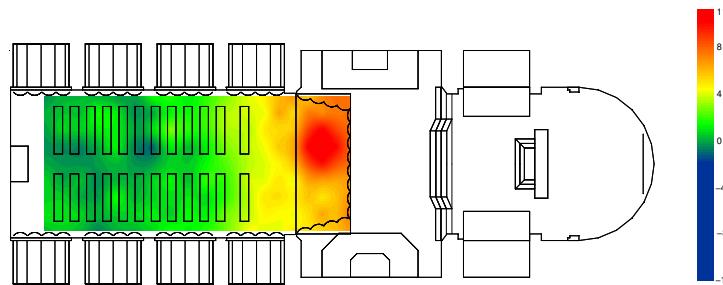


Figura 6.21: *Stato di progetto 4*: mappa dell'indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

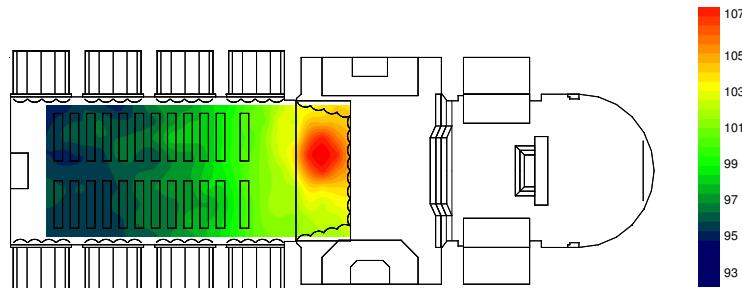


Figura 6.22: *Stato di progetto 5*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

standard dal comportamento acustico noto, intervenendo poi nel disegno delle superfici divergenti e nella superficie del palcoscenico, ora maggiore, così come l'altezza complessiva della camera. In figura 6.28 se ne può vedere il modello, invece, dalla tabella 6.2 e dalle figure 6.29 e 6.30 se ne può dedurre il comportamento acustico, che risulta in linea con quello di SdP 2: i tempi di riverbero sono complessivamente migliorati in virtù dell'aggiunta di tende acusticamente assorbenti a copertura delle otto cappelle laterali e della sostituzione delle pance con poltrone.²⁰

²⁰Anche se tale sostituzione non dovesse concretizzarsi, l'uso di materiali molto assorbenti nell'area occupata dal pubblico simula efficacemente gli effetti di quest'ultimo sull'acustica dell'ambiente.

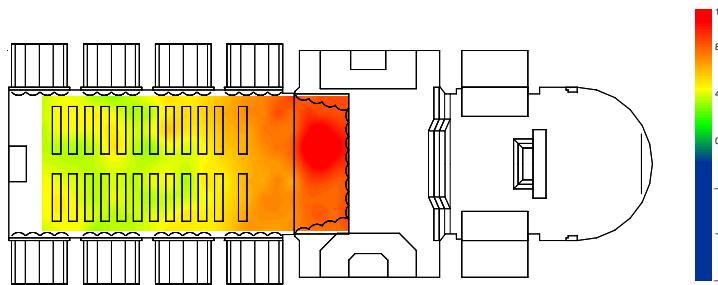


Figura 6.23: *Stato di progetto 5*: mappa dell'indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

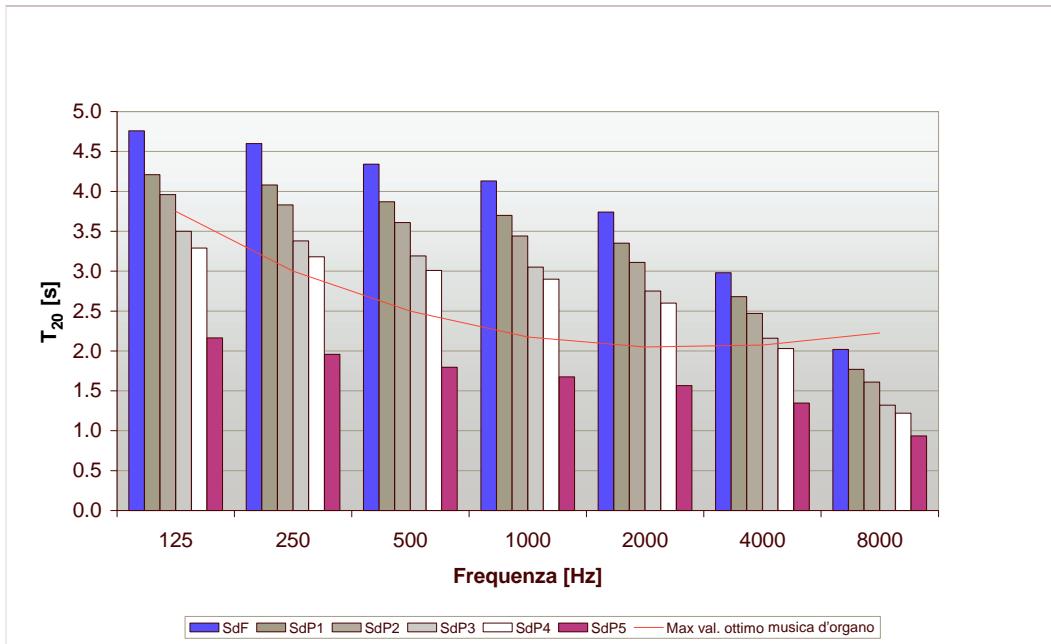


Figura 6.24: T_{20} ottimale per la musica d'organo a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto.

6.2.4 Possibili reimpieghi

Una camera d'orchestra, pur essendo sovente progettata specificatamente per un particolare ambiente, non è necessariamente legata in maniera indissolubile a

| f_{cb} | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 3.38 | 3.11 | 2.82 | 2.65 | 2.47 | 2.05 | 1.41 |

Tabella 6.2: Valori di T_{20} (s) relativi al progetto scelto.

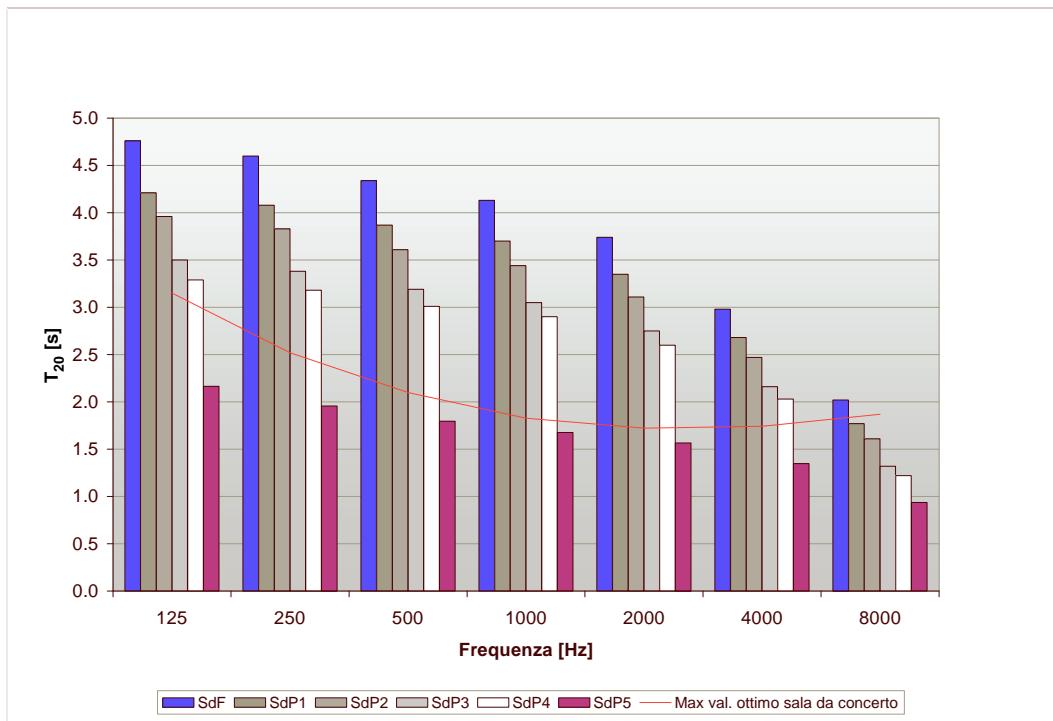


Figura 6.25: T_{20} ottimale per una sala da concerti di equivalente cubatura a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto.

quest'ultimo; la struttura modulare con cui esse vengono d'abitudine realizzate e l'investimento finanziario che costituiscono sono due valide ragioni che spingono all'ideazione di soluzioni di reimpiego del materiale. Il caso in esame non fa certamente eccezione, per questo, a conclusione del lavoro, si vogliono presentare 3 utilizzi alternativi:

Musica all'aperto Nella città di Parma, durante il periodo estivo, si tengono diversi appuntamenti musicali all'aperto; da un punto di vista acustico non si tratta certo di situazioni ideali, per via dell'elevata dispersione di energia sonora in tutte le direzioni che si verifica. L'adozione di una camera d'orchestra, per le motivazioni già viste, può senza dubbio minimizzare tali sprechi, consentendo una generale miglior fruizione dello spettacolo e condizioni di esecuzione più favorevoli per i musicisti. Per insiemi di dimensioni medie, la medesima camera di cui al paragrafo 6.2.3 è già una buona scelta.

Camera ridotta il progetto *San Vitale* nella sua versione finale prevede la co-

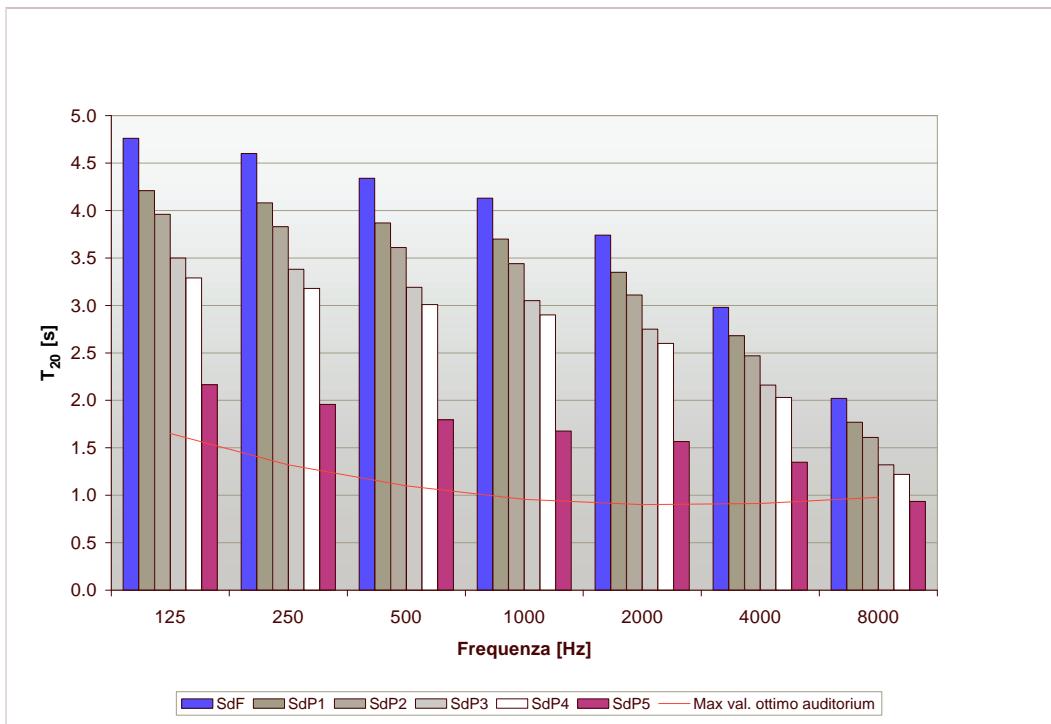


Figura 6.26: T_{20} ottimale per un auditorium destinato a conferenze di equivalente cubatura a confronto con i valori ottenuti nei vari stati di progetto.

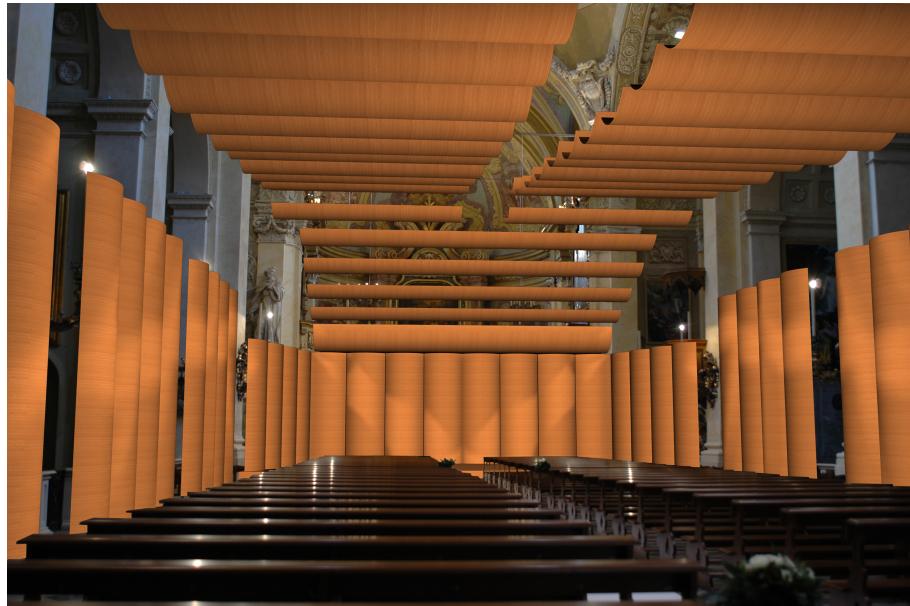


Figura 6.27: *Stato di progetto 4*: visualizzazione dell'allestimento inserito nella chiesa.

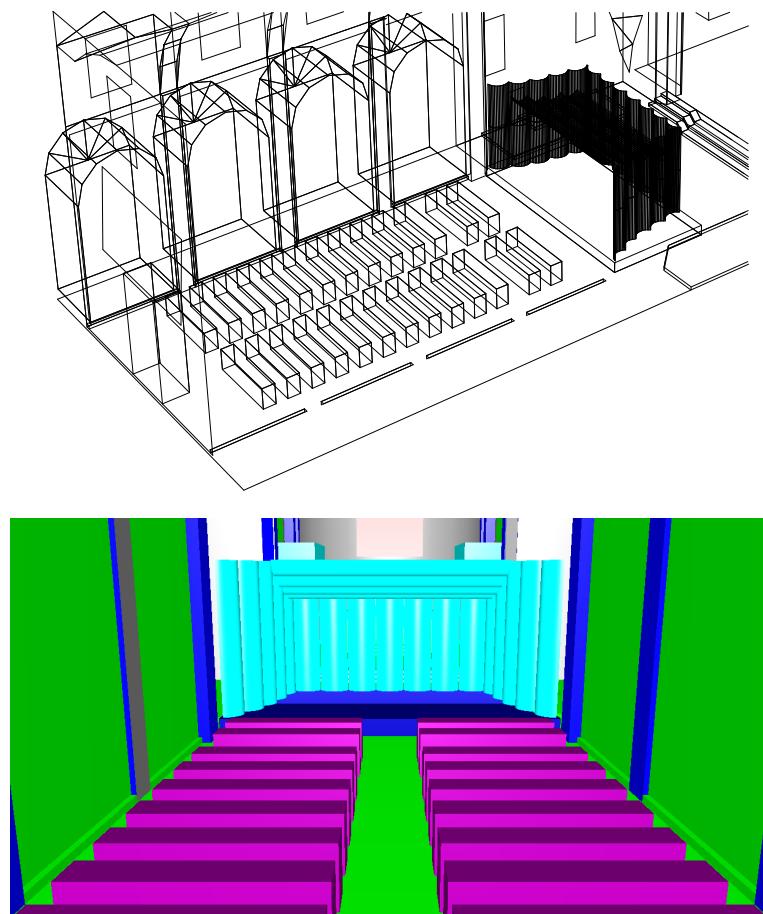


Figura 6.28: *Progetto scelto*: particolare del modello tridimensionale e *rendering*.



Figura 6.29: *Progetto scelto*: mappa del *Sound Pressure Level* (media pesata ‘A’).

struzione di 47 pannelli: una decina di questi possono dare forma ad una struttura di dimensioni più ridotte adatta per piccoli gruppi o solisti, di cui si riporta in figura 6.31 una possibile realizzazione. Ancora una volta la



Figura 6.30: *Progetto scelto*: mappa dell'indice C_{80} (banda con $f_{cb} = 1$ kHz).

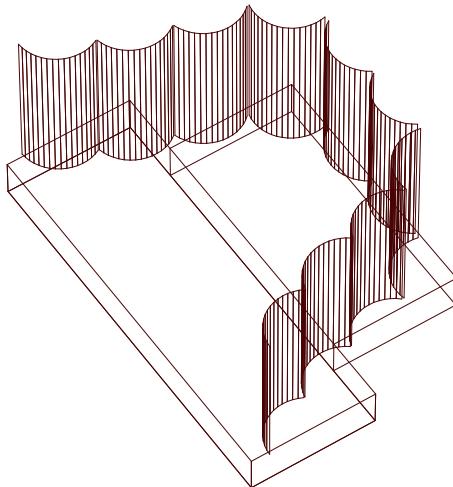


Figura 6.31: Camera d'orchestra in versione ridotta (10 pannelli).

possibile destinazione sono i concerti all'aperto in ambienti dalla ristretta estensione superficiale, ad esempio il cortile della *Casa della Musica*.

Camera teatro L'attuale camera d'orchestra del *Teatro Regio* di Parma è una struttura la cui decorazione ha un notevole impatto scenico, ma completamente inefficace da un punto di vista acustico, essendo costituita sostanzialmente da telai su cui è tesa la tela dipinta; un'idea con cui colmare questa lacuna potrebbe prevedere la realizzazione di un'altra camera, mediante gli stessi pannelli del progetto *San Vitale*, tale da “avvolgere” esternamente la camera esistente. La nuova camera risulterebbe così invisibile al pubblico, ma eviterebbe l'attuale, cospicua, dispersione di energia sonora nel retro

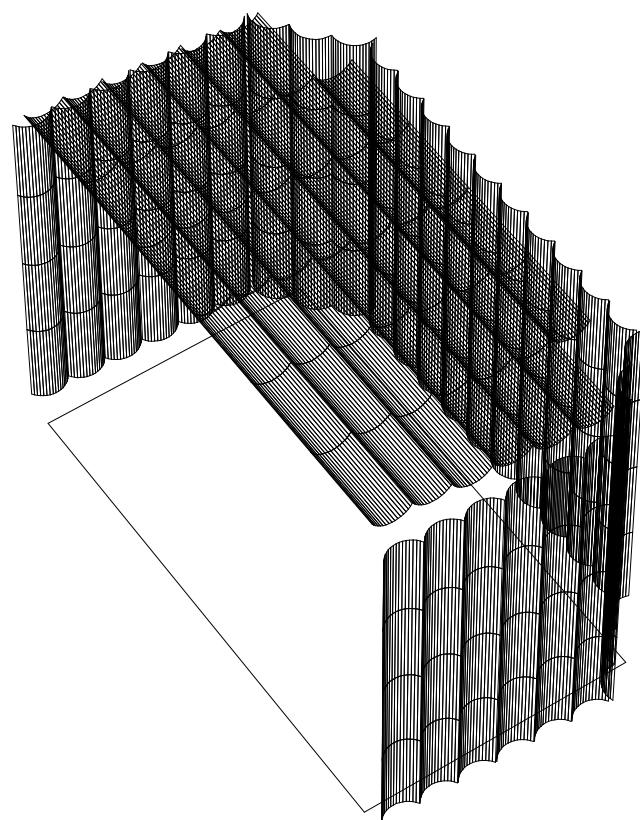


Figura 6.32: Camera d'orchestra per il *Teatro Regio* (152 pannelli).

del palcoscenico. Una struttura possibile è riportata in figura 6.32, per la quale sono necessari almeno 152 pannelli.

Capitolo 7

Conclusioni

Come ricordato in premessa a questo scritto, i fronti su cui si è operato sono stati principalmente due, quello dello sviluppo di uno strumento di progetto e quello della progettazione vera e propria applicata a due casi dalle problematiche ben distinte. Necessariamente le conclusioni debbono essere distinte, mantenendo tuttavia ben in evidenza il denominatore comune dell'intero lavoro, ossia l'analisi e l'elaborazione dei dati ottenibili da programmi di simulazione acustica.

getIR Si tratta di un software ancora acerbo, i cui attuali problemi sono prevalentemente dovuti alla gioventù ed alle mire piuttosto alte del progetto. *getIR*, infatti, punterebbe a diventare uno strumento di sintesi di risposte all'impulso estremamente versatile e flessibile, in grado di produrre segnali anche multicanale dall'elevato grado di realismo ed utili anche a fini di misura (*AQT*). Nel momento in cui si scrive, i moduli mono e binaurale hanno mostrato discrete prestazioni: l'ascolto di segnali anechoici convoluti è risultato gradevole e correttamente spazializzato. Non è stato ancora valutato a fondo il modulo *B-Format* poiché estremamente recente, ma si conta di farlo quanto prima. Le tabelle 5.16 e 5.17 mostrano chiaramente i limiti cui si faceva riferimento poco sopra: ciò che ancora non è stato studiato è un fattore correttivo per regolare la ripartizione di energia tra testa e coda riverberante del segnale, la cui assenza, ragionevolmente, origina simili risultati. L'osservazione dello spettro di figura 5.14 mostra, inoltre, la presenza di una serie di picchi nelle alte frequenze, dovuti al fatto che 12 frequenze per colmare le ultime 2-3 bande sono probabilmente poche: così

come si sono adottati *burst* temporali di lunghezza variabile con la banda, bisognerà impiegare diversi insiemi di frequenze, il cui numero cresca con la larghezza della banda stessa. È allo studio anche la possibilità di parametrizzare la lunghezza dei *burst* in modo da poter compiere sperimentazioni in questo senso.

Simulazioni dell'abitacolo di un'autovettura Ribadendo il fatto che in questo lavoro ci si è occupati solo di una parte del progetto, si rimarcano solo un paio di osservazioni che potrebbero migliorare le rilevazioni effettuate: la prima riguarda i diagrammi di direttività degli altoparlanti che, non essendo reali, possono aver alterato le misure ricavate da dati simulati. La seconda rimanda al software *getIR*, il quale dovrebbe consentire di eseguire *Acoustic Quality Test* più verosimili.

Progetto San Vitale La progettazione della camera d'orchestra non è certamente conclusa con questo lavoro, il quale, però, ne costituisce il fondamento: le domande *cosa?* e *come?* hanno avuto risposta e sono noti anche gli ordini di grandezza dei risultati ottenibili. Ciò che resta da studiare - ma lo si farà in sede di progetto esecutivo - è l'ottimizzazione della struttura, ossia la valutazione accurata di quell'inclinazione dei pannelli che garantisce la migliore *illuminazione* acustica dell'uditario.

Appendice A

Definizioni

La presente appendice riporta tutte quelle definizioni indispensabili per una corretta comprensione degli argomenti trattati, ma il cui inserimento all'interno del testo si è ritenuto appesantisce eccessivamente la lettura. Per lo più dovrebbero essere tutti argomenti noti, pertanto non saranno qui approfonditi in dettaglio, giusto un riferimento immediato per rinfrescare i ricordi del lettore.

A.1 Propagazione di onde sonore

Un'onda sonora¹, come risaputo, è una perturbazione della pressione atmosferica avente la proprietà di propagarsi; affinché questo possa avvenire occorrono due elementi indispensabili: una causa ed un mezzo. Il primo potrà essere un sistema meccanico oscillante con sufficiente frequenza², mentre il secondo è, in generale, un fluido, di norma l'aria.

La descrizione fisica della propagazione delle onde suddette avviene tramite 3 leggi fondamentali che di seguito si riassumono:

L'equazione di Eulero. Siano p la pressione sonora, \mathbf{u} il vettore velocità istantanea di una particella di fluido e ρ_0 la densità dell'aria in condizioni normali, allora si ha:

¹Vedi [8], capitolo 3.

²Un'onda di pressione perché venga percepita dall'apparato uditivo umano deve avere frequenza compresa tra 20 Hz e 20000 Hz circa, a seconda dell'individuo.

$$\nabla p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}. \quad (\text{A.1})$$

La relazione A.1 altro non è che l'equivalente fluidodinamico della seconda legge newtoniana della dinamica, da cui deriva, ed esprime in sostanza le condizioni di equilibrio dinamico delle forze agenti su un elemento di fluido.

L'equazione di continuità. Se si esprime con δ la variazione relativa di densità, o *condensazione*³, del mezzo e con \mathbf{s} il vettore spostamento, per un generico elemento di fluido vale la legge

$$\delta = -\nabla \cdot \mathbf{s}, \quad (\text{A.2})$$

che sintetizza il principio secondo cui il flusso netto di massa, ossia la differenza tra quello entrante e quello uscente, deve essere uguagliato dalla variazione di massa di fluido contenuta dall'elemento.

L'equazione di stato termodinamico. Ipotizzando ragionevolmente variazioni di stato talmente rapide da poter essere ritenute adiabatiche ed indicando con p_0 il valore della pressione sonora a riposo e con γ il rapporto tra i calori specifici del gas, rispettivamente, a pressione e volume costante, il comportamento termodinamico del fluido in questione è dato da

$$\frac{1}{p_0} \frac{\partial p}{\partial t} = \gamma \frac{\partial \delta}{\partial t}. \quad (\text{A.3})$$

Dalle relazioni A.1, A.2 e A.3, dopo qualche passaggio, si ricava l'*equazione di propagazione delle onde sonore*:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (\text{A.4})$$

in cui c è la velocità di propagazione dell'onda sonora nel gas, definita come

³È data da

$$\delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}$$

dove ρ è densità dell'elemento di fluido considerato.

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}. \quad (\text{A.5})$$

A.2 Impedenza acustica e *Complex Reflection Factor*

Si supponga di avere un'onda sonora piana propagantesi in un fluido, ogni elemento del quale è caratterizzato da un valore istantaneo di pressione p e di velocità u lungo la direzione di propagazione: si definisce *impedenza acustica* Z il rapporto:

$$Z = \frac{p}{u}, \quad (\text{A.6})$$

che, in particolare, per le onde piane è costante e vale $Z_0 = \rho_0 c$. In generale, però, essendo p e u grandezze che variano sinusoidalmente⁴ e quindi sovente rappresentate con fasori complessi, l'impedenza acustica non è costante né, tantomeno, reale, ma si tratta di un numero complesso

$$Z = R + jX, \quad (\text{A.7})$$

dove R è detta resistenza acustica specifica e X reattanza acustica specifica. Questo si traduce nel fatto che pressione e velocità non sono necessariamente in fase tra loro e tale sfasamento è rappresentato dalla comparsa di un termine reattivo.

L'impedenza acustica viene misurata in *rayl*.

Lo studio dell'impedenza acustica complessa assume particolare importanza nei meccanismi di trasmissione di un'onda sonora in mezzi differenti, infatti, in modo assolutamente analogo ai fenomeni elettromagnetici, il trasferimento di energia acustica è massimizzato quando vi è adattamento delle impedenze (*impedance matching*), viceversa compariranno onde riflesse.

⁴Se non è sinusoidale l'onda, lo sono certamente le sue componenti frequenziali.

Dalla definizione di impedenza acustica deriva anche quella di coefficiente di riflessione, che, per l'occasione, viene ribattezzato *Complex Reflection Factor* (*CRF*), al fine di sottolinearne la natura complessa. La definizione è

$$CRF = \frac{p_r}{p_i}, \quad (\text{A.8})$$

dove p_i e p_r sono, rispettivamente, le pressioni delle onde riflessa ed incidente, mentre il coefficiente di riflessione r , definito al paragrafo 4.1.1, è dato da

$$r = |CRF|^2, \quad (\text{A.9})$$

essendo associato all'energia e non alla pressione, infine

$$CRF = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (\text{A.10})$$

in cui Z_0 è l'impedenza acustica dell'aria (pari a circa 415 rayl) e Z quella della superficie.⁵ Tuttavia il *CRF* è un parametro misurato⁶ di rado, che quasi mai si ritrova nei *datasheet* dei materiali.

A.3 Intensità, densità di energia e potenza

Di seguito si riportano le definizioni di alcune grandezze fondamentali⁷:

Intensità sonora. È la quantità di energia che fluisce, nell'unità di tempo, attraverso una superficie di area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. L'*intensità istantanea* è data da

$$I = p_m u_m \cos^2 \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (\text{A.11})$$

dove p_m e u_m sono i valori di picco di pressione e velocità relative alla direzione di propagazione considerata, mentre l'*intensità media* dalla relazione

⁵Spesso l'impedenza acustica di una superficie viene riferita a quella dell'aria ed indicata con $z = Z/Z_0$.

⁶A questo proposito si veda [1]

⁷Per i dettagli si rimanda sempre a [8].

$$\bar{I} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]. \quad (\text{A.12})$$

La quasi totalità delle sorgenti reali, però, non irradia energia uniformemente in tutte le direzioni, tale caratteristica viene misurata da una grandezza denominata *direttività* ed indicata con Q ; si ha

$$Q = \frac{I_{\theta,\phi}}{\bar{I}}, \quad (\text{A.13})$$

dove $I_{\theta,\phi}$ è l'intensità irradiata nella direzione specificata, in coordinate sferiche, dagli angoli θ e ϕ .

Densità di energia sonora. È l'energia contenute in un'unità di volume del mezzo ed è data da

$$D = \frac{\bar{I}}{c^2} = \frac{p_{\text{rms}}}{\rho_0 c^2} \quad \left[\frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right]. \quad (\text{A.14})$$

Potenza sonora. Supponendo che tutta l'energia sonora fluente nel mezzo sia prodotta da una sola e ben identificabile sorgente, l'energia irradiata nell'unità di tempo da quest'ultima rappresenta la sua potenza sonora W . Se S è una superficie immaginaria inviluppante la sorgente ed I_s l'intensità sonora rilevata su un area elementare dS della superficie, risulta

$$W = \int_S I_s dS. \quad (\text{A.15})$$

A.4 Livelli sonori

Per via dell'enorme capacità dinamica dell'orecchio umano difficilmente viene adottata la scala lineare per rappresentare le grandezze acustiche: dovendo trattare con un campo di valori estremamente esteso e disperso⁸ è universalmente preferita la scala dei decibel, codificata nella norma ISO 1648. Premettendo che

⁸La minima pressione percepibile da un individuo normo udente è di $20 \mu\text{Pa}$, la soglia del dolore è, invece, attorno ai 60 Pa .

un valore espresso in decibel implica *sempre* un rapporto con un altro valore di riferimento, di seguito si riportano le principali grandezze impiegate:

Livello di pressione sonora.

$$\begin{aligned} L_p &= 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = \\ &= 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [\text{dB}], \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

dove $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. La A.16 si può anche riscrivere nel seguente modo, dopo aver sostituito il valore di p_0 :

$$L_p = 10 \log p^2 + 94 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.17})$$

Livello di potenza sonora.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.18})$$

dove $W_0 = 1 \text{ pW}$. Sostituendo quest'ultimo valore nella A.18 si ricava

$$L_W = 10 \log W + 120 \quad [\text{dB}]. \quad (\text{A.19})$$

Livello di intensità sonora.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}], \quad (\text{A.20})$$

dove $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$. È largamente in uso esprimere anche la direttività in decibel: in questo caso il parametro definito dall'equazione A.13 prende il nome di *Directivity Index* ed è così definito

$$\begin{aligned} DI &= 10 \log Q = \\ &= L_{I_{\theta,\phi}} - L_{\bar{I}}. \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

Se $\rho_0 c$ vale 400 rayl risulteranno uguali $\rho_0 c I_0$ e p_0^2 , cioè sarà verificata la relazione

$$L_I = L_p. \quad (\text{A.22})$$

Tale situazione si avrebbe a pressione atmosferica e temperatura di 39°C; alla temperatura di 20°C il valore dell'impedenza acustica sale a 415 rayl, tuttavia l'errore commesso applicando ugualmente la A.22 è comunemente ritenuto trascurabile.

Se l'intensità sonora I è uniforme su una superficie S che circoscrive una sorgente di potenza W si può scrivere:

$$10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad [\text{dB}]; \quad (\text{A.23})$$

se, poi, $S_0 = S = 1 \text{ m}^2$, risulta esattamente

$$L_W = L_I. \quad (\text{A.24})$$

A.5 Curve di ponderazione

La sensibilità dell'orecchio umano non è costante in tutta la banda udibile, ma presenta un massimo nella regione attorno a 4 kHz ed ha i valori minimi in corrispondenza degli estremi, come evidenziato dalle curve isofoniche elaborate da Fletcher e Munson.⁹ Questo ha portato all'ideazione delle unità di misura *percettive* (la scala dei *phon*) ed ha suggerito l'adozione negli strumenti di misura di un filtraggio dei livelli rilevati in modo da renderli coerenti alla reale sensibilità umana. Il suddetto filtraggio è codificato nelle cosiddette *curve di ponderazione*, le quali non fanno altro che indicare l'alterazione della risposta in frequenza dello strumento, ossia il fattore con cui debbono essere pesate le frequenze della banda audio. In figura A.1 sono riportate le curve di ponderazione A, B e C che sono, sostanzialmente, le curve isofoniche a 40, 70 e 100 phon rispettivamente.

⁹Si veda [7] al capitolo 2.

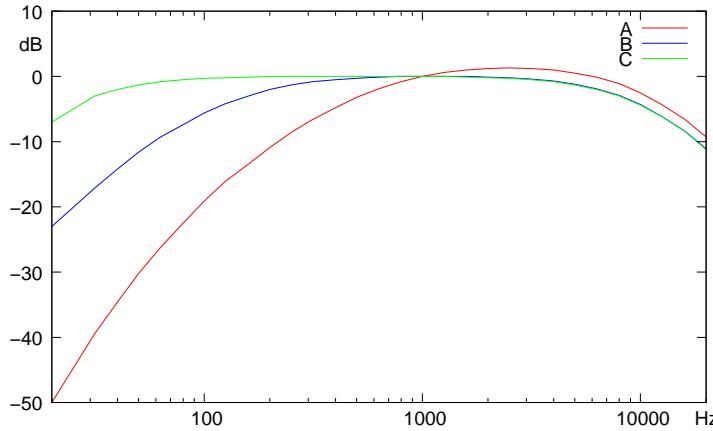


Figura A.1: Curve di ponderazione A, B e C.

A.6 Trasformata di Fourier

L'argomento è enorme, in questa sede se ne vuole solo riportare la definizione operativa. Se $x(t)$ è una funzione

- limitata
- tale da presentare un numero finito di discontinuità
- assolutamente integrabile

allora la sua trasformata secondo Fourier è data dalla relazione

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt. \quad (\text{A.25})$$

La trasformata inversa del segnale $X(f)$, invece si può calcolare mediante l'equazione

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df. \quad (\text{A.26})$$

In generale affinchè esista la trasformata di Fourier del segnale $x(t)$, per il teorema di Plancherel è sufficiente che quest'ultimo abbia energia finita, caratteristica, questa, di tutti i segnali fisici.

A.7 Trasformata di Hadamard

La trasformata di Hadamard, nota anche come *trasformata di Walsh-Hadamard*, è un esempio di classe generalizzata di trasformate di Fourier ed esegue un'operazione ortogonale, simmetrica, involutiva e lineare su 2^m numeri reali o complessi. Essa può equivalentemente essere vista come una *trasformata discreta di Fourier (DFT)* multidimensionale di lunghezza $2 \times 2 \times \cdots \times 2 \times 2$, tale da scomporre un arbitrario vettore in una sovrapposizione di funzioni di Walsh.

La trasformata di Hadamard H_m è una matrice $2^m \times 2^m$, detta *matrice di Hadamard*, che trasforma 2^m numeri reali x_n in 2^m numeri reali x_k , la cui definizione può seguire due strade, quella ricorsiva oppure quella che vede l'utilizzo della rappresentazione binaria degli indici n e k

1. Ricorsivamente, si definisce la matrice di Hadamard $1 \times 1 H_0$ come la matrice identità $H_0 = 1$, mentre la matrice H_m (per $m > 0$) è data da:

$$H_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} H_{m-1} & H_{m-1} \\ H_{m-1} & -H_{m-1} \end{pmatrix}, \quad (\text{A.27})$$

dove $1/\sqrt{2}$ è il fattore di normalizzazione, talvolta omesso. Le matrici di Hadamard, a meno del fattore di normalizzazione, sono interamente composte da '1' e '-1'.

2. Equivalentemente, la matrice di Hadamard può essere definita dal suo (k, n) -esimo elemento, scrivendo $k = k_{m-1}2^{m+1} + k_{m-2}2^{m+2} + \cdots + k_12 + k_0$ e $n = n_{m-1}2^{m+1} + n_{m-2}2^{m+2} + \cdots + n_12 + n_0$, dove k_j e n_j sono la rappresentazione binaria di n e k rispettivamente. In questo caso si ha:

$$(H_m)_{k,n} = \frac{1}{2^{m/2}} (-1)^{\sum_j k_j n_j}. \quad (\text{A.28})$$

Se si considerano gli ingressi e le uscite come vettori multidimensionali indicizzati da n_j e k_j , la A.28 è esattamente una *DFT* multidimensionale $2 \times 2 \times \cdots \times 2 \times 2$ normalizzata ad 1.

Bibliografia

- [1] P. BONFIGLIO, N. PRODI, F. POMPOLI, E A. FARINA, *On the Use of a P-U Sound Intensity Probe for the Qualification of Complex Surface Properties*, in 13th ICSV, Vienna, lug. 2006.
- [2] F. BAROCELLI (A CURA DI), *La Chiesa di San Vitale, il monumento ritrovato*, Mazzotta, Milano, giu. 2005. ISBN 88-202-1763-5.
- [3] A. FARINA, G. CIBELLI, E A. BELLINI, *AQT - A New Objective Measurement of the Acoustical Quality of Sound Reproduction in Small Compartments*, in 110th AES, Amsterdam, mag. 2001.
- [4] A. FARINA E L. TRONCHIN, *Computer Simulation af Binaural, Stereo-Dipole, B-Format and Ambiophonics Impulse Responses*, in ICA-2001, Roma, set. 2001.
- [5] L. SCHOMAKER ET AL., *MIAMI: A Taxonomy of Multimodal Interaction in the Human Information Processing System*, in Esprit Project 8579, feb. 1995, <http://www.ai.rug.nl/~lambert/projects/miami/taxonomy/taxonomy.html>.
- [6] H. LOPACZ E P. KLECKOWSKI, *Synthesis of Room Impulse Response Based on the Discrete Wavelet Transform*, in 109th AES Convention, Los Angeles, set. 2000.
- [7] R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Manuale di acustica applicata*, UTET, Torino, Italy, 3 ed., gen. 2005. ISBN 88-7750-710-1.
- [8] S. CINGOLANI E R. SPAGNOLO (A CURA DI), *Acustica musicale e architettonica*, UTET, Torino, Italy, 1 ed., dic. 2005. ISBN 88-7750-941-4.

- [9] W. C. SABINE, *Collected papers on acoustic*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), 1922. Ristampa: Dover, New York, 1964.

Quanto più mi soffermo a pensare, tanto più le parole mancano per descrivere i ricordi, gli istanti, le persone di questi quasi dieci anni di studi; come una lunga pellicola che scorre nella mente senza fermarsi, un fotogramma dopo l'altro, così le emozioni si susseguono di continuo nel cuore, senza respiro, poiché è in quest'apnea che ho trascorso il mio periodo di studi.

Un obiettivo era di fronte a me, ma quante volte ho disperato di poterlo anche soltanto avvicinare. Quante volte un interrogativo si è fatto prepotentemente strada: ero davvero destinato a quella meta? Già, perché raggiungerla forse non basta, poiché al traguardo sono in tanti ad arrivarci, ma sono poi così tanti quelli che corrono con vera passione? Questa infatti avrebbe dovuto essere il vero motore del mio inseguire, quella stessa passione che, da studente dell'ultimo anno delle scuole superiori, mi fece guardare con ammirazione ed entusiasmo all'imminente avventura universitaria.

Evidentemente c'era, e se riuscì a spingermi nel decennio del corso di organo al conservatorio, poteva certo continuare a farlo nel tecnocratico mondo della facoltà di ingegneria; in effetti, nonostante le iniziali, amare, delusioni, così è stato.

L'illuminante incontro con il professor Farina nel corso di Acustica Applicata, poi, mi ha fatto chiaramente capire di non essere un romantico, o, perlomeno, di non essere il solo: di rado ho incontrato una simile capacità comunicativa unita ad una così vasta ed onesta competenza in un docente ed il segreto credo proprio sia scritto poche righe più sopra: si tratta di una di quelle persone che hanno corso e tuttora corrono con smisurata passione (soprattutto in moto). Da quell'incontro la decisione: se tesi doveva essere, allora non poteva che riguardare l'acustica, così da conciliare in angelica guisa i due estremi, artistico e tecnologico, che da sempre controbilanciano la mia esistenza.

Pensando a questi ultimi mesi, quindi, debbo necessariamente ricordare Andrea (Capra) e Paolo (Martignon), correlatori sì, ma, me lo si permetta, soprattutto amici, anche loro avviluppati, a suo tempo, nell'occhio di quel farinaceo vortice che ora ci accomuna. Quindi l'altro Paolo (Galaverna) e l'altro Andrea (Rosati) alle cui conoscenze e capacità professionali sovente ho dovuto rivolgermi.

Sento, inoltre, il dovere di scrivere i nomi di coloro che in questi anni - e, mi auguro, in futuro - mi sono stati accanto, sia nella gioia, sia quando sentimenti più tristi risiedevano nel mio animo: Michele, Gianluca, Francesco Saverio, Rafaele, Franco. Credo che definirli soltanto amici sia riduttivo, vista l'abbondanza

di significati con cui spesso viene rivestito questo termine.

Debbo riservare un posto speciale a tutta la Corale Città di Parma, maestri, direttori e coristi, in particolare al coro misto che ora, indegnamente, mi trovo a dirigere: vorrei riportare i nomi di ognuno, non lo faccio per il timore di dimenticarne anche uno soltanto.

Ricordo anche chi mi è stato molto vicino fino a non troppo tempo fa: caratteri e circostanze ci hanno condotti per altre strade, ma simili esperienze non si possono cancellare facilmente.

Tutte queste persone, unitamente a molte altre che non cito per ragioni di sintesi, vorrei stringerle a me in un grande abbraccio, perché esse hanno contribuito a rendere speciale la mia vita, non gli studi.

Non è però finita. Mancano ancora due persone che voglio citare in conclusione perché i loro nomi non si perdano nella concitazione dei ringraziamenti. Si chiamano Ivo ed Elsa e sono i miei genitori. Dire grazie non è sufficiente, poiché a loro devo tutto quanto. Non mi avranno insegnato la matematica, la musica e quant'altro, ma da sempre la loro stessa vita testimonia giorno per giorno il significato della parola amore.

Typesetted on 2007 february 27 with L^AT_EX 2 _{ε}