

AoI  
92

Francesco Russo  
Ciro Schettino

# Problemi d'Acustica nelle sale da concerto



Copyright © MMVII  
ARACNE editrice S.r.l.

[www.aracneeditrice.it](http://www.aracneeditrice.it)  
[info@aracneeditrice.it](mailto:info@aracneeditrice.it)

via Raffaele Garofalo, 133 A/B  
00173 Roma  
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-1016-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: marzo 2007

## Notazioni

FT	Trasformata di Fourier
IFT	Antitrasformata di Fourier
dB	Decibel
SPL	Livello di pressione sonora
ITDG	Tempo di ritardo della prima riflessione
LE	Efficienza laterale
IACC	Correlazione mutua interaurale
RT	Tempo di riverbero
C50	Indice di chiarezza
D	Indice di definizione
LTI	Sistema lineare tempo invariante
*	Operazione di convoluzione

## Indice

Notazioni .....	5
Introduzione .....	9

### Capitolo 1 Acustica nelle sale

1.1 Caratteristiche del campo sonoro nelle grandi sale .....	11
1.2 Il campo acustico diretto .....	11
1.3 Il campo acustico riflesso .....	12
1.4 Parametri oggettivi e soggettivi nella valutazione del campo .....	15
1.5 Criteri progettuali .....	17
1.6 Metodi e strumenti di previsione acustica .....	19
1.7 Sale come sistemi lineari tempo-invarianti .....	20
1.8 Relazione ingresso-uscita .....	23
1.9 Campionamento del suono .....	26
1.10 Utilità di lavorare nel dominio delle frequenze .....	28

### Capitolo 2 Analisi timbrica del suono

2.1 Equazioni cartesiane indefinite della Meccanica dei fili .....	31
2.2 Equazione delle corde vibranti .....	34
2.3 Problema al contorno .....	37
2.4 Metodo di separazione delle variabili .....	40
2.5 Proprietà degli autovalori e delle autofunzioni di problemi ai limiti di Sturm-Liouville .....	41
2.6 Scomposizione in vibrazioni principali della vibrazione corrispondente a condizioni iniziali generiche .....	44
2.7 Corda omogenea a tensione costante e con estremi fissi .....	46
2.8 Caso in cui la corda viene pizzicata o percossa .....	49
2.9 Equazione delle corde in presenza di attrito .....	52

**Capitolo 3**  
**Effetti psicoacustici**

3.1	Effetto Haas (o di precedenza) .....	57
3.2	Verifica effetto di precedenza .....	59
3.3	“Cocktail-party effect” .....	60

**Capitolo 4**  
**Strumenti di previsione acustica**

4.1	Descrizione funzionamento del programma .....	63
4.2	Simulazioni al computer .....	65
4.2.1	Misure sulla sala Elmia.sur .....	65
4.2.2	Misure sulla sala Danish Radio Concert Hall .....	69
4.2.3	Misure sulla sala Example .....	71
4.2.4	Modifica materiali sulle sale Danish e Example .....	74

<b>Appendice A</b>	– Delta di Dirac .....	77
--------------------	------------------------	----

<b>Appendice B</b>	– Trasformate e antitrasformate .....	79
--------------------	---------------------------------------	----

Bibliografia .....	81
--------------------	----

Indice analitico .....	83
------------------------	----

## INTRODUZIONE

La progettazione degli ambienti dedicati all'ascolto della musica o allo svolgimento di conferenze deve prendere in considerazione due aspetti essenziali: le caratteristiche acustiche e psicoacustiche dell'apparato uditivo umano e le modificazioni apportate dall'ambiente ai suoni in esso pensati.

I suoni che percepiamo non ci giungono così come sono stati emessi dalla sorgente sonora, ma vengono sempre, in maniera più o meno rilevante, modificati dall'ambiente in cui ci troviamo; da qui nasce il problema del rapporto tra suono e spazio acustico e quindi quello di una sua progettazione che consenta di controllare la qualità di fruizione del messaggio sonoro.

Siamo in grado di misurare in modo oggettivo una temperatura, una pressione, una massa, ma altra cosa è valutare oggettivamente la percezione neuronale che ci porta a definire i concetti di "più caldo" e "più freddo", "più rumoroso" ecc.

L'acustica assume notevole importanza pratica nel momento in cui si cerca di valutare l'impatto che certi fenomeni fisici hanno sull'uomo.

La psicoacustica studia le relazioni che legano una grandezza oggettiva a quella soggettiva che esprime la sensazione che un individuo prova. Gli effetti psicoacustici considerati in questa tesi (Capitolo 3) sono essenzialmente due: effetto di precedenza, effetto del "cocktail party". Il primo è legato alla localizzazione della provenienza dei suoni, il secondo invece, al mascheramento di un suono (udibile se isolato) ad opera di un secondo suono più intenso.

Per presentare le migliori qualità acustiche, una sala deve essere progettata in modo che la riflessione del suono sia relativamente intensa, senza tuttavia introdurre un'eccessiva riverberazione di alcune frequenze rispetto ad altre evitando di creare echi innaturali e senza produrre effetti indesiderati di interferenza e di distorsione.

Le considerazioni legate all'interazione tra suono e spazio spingono verso lo studio della cosiddetta risposta all'impulso di un ambiente (Capitolo 1) che è strettamente legata alla natura timbrica del suono in oggetto. Il Capitolo 2 di questa tesi, a titolo esemplificativo, è stato pertanto dedicato all'analisi timbrica del suono prodotto da una corda fissata agli estremi e pizzicata o percossa.

Il problema dell'acustica delle sale richiede la considerazione di un certo numero di parametri acustici, tra i quali, i principali sono il tempo di riverberazione, l'indice di chiarezza, il livello di pressione sonora (Capitolo 1). Nel Capitolo 4 abbiamo realizzato una serie di simulazioni al computer mediante il programma Acoustic Rooms Odeon 6.0. I parametri acustici menzionati sono stati direttamente calcolati dal programma e comportano una complessa interpretazione alla luce della nostra sensibilità uditiva e della collocazione dell'uditore nello spazio musicale. Tuttavia oggi è possibile verificare direttamente attraverso il computer il risultato fonico che la simulazione presenta. Questa tecnica viene chiamata auralizzazione e può essere indicata come il processo di filtraggio di un segnale anecoico atto a riprodurre all'orecchio dell'ascoltatore l'effetto psicoacustico di un ambiente includendo la riverberazione, la colorazione timbrica, la localizzazione spaziale.

Napoli, 18 settembre 2006



# Capitolo 1

## Acustica nelle sale

### 1.1 Caratteristiche del campo sonoro nelle grandi sale

Il campo acustico in un ambiente fisicamente confinato differisce da quello di uno spazio aperto per la presenza, accanto alle onde sonore dirette (sorgente–ascoltatore), di onde sonore riflesse in vario modo dalle superfici delimitanti l'ambiente. La qualità acustica di una sala è determinata dalle rispettive entità e dalle modalità di sovrapposizione dei due campi sonori: quello diretto e quello riverberato (o diffuso). La combinazione ottimale dei due campi varia con il tipo di segnale sonoro da trasmettere nella sala: parlato o musica di vario genere.

Nel caso delle sale per concerti infatti è desiderabile un prolungamento di ogni singolo impulso sonoro (fonema o nota musicale) senz'altro maggiore che per le sale per conferenze o i teatri per la prosa; l'entità di tale prolungamento, che chiameremo “coda sonora”, varia con i generi musicali.

### 1.2 Il campo acustico diretto

Il campo acustico diretto si studia essenzialmente per valutare la distanza massima sorgente — ascoltatore che consenta una corretta percezione del segnale sonoro in assenza di dispositivi di elettroamplificazione. In conseguenza di tali valutazioni si può studiare la possibilità di inserire gallerie e balconate o di inclinare opportunamente la platea.

Il livello di pressione sonora dell'onda diretta che raggiunge l'ascoltatore (SPL) dipende da vari fattori:

- *potenza della sorgente*, per una voce umana forte si può assumere un livello di potenza (mediato nel tempo e relativo alla totalità delle frequenze presenti) di 75 dB per la voce maschile, 73 per la voce femminile, per un “fortissimo” orchestrale il livello è di circa 100 dB,
- *direttività della sorgente*,

– *rumore di fondo*, va massimizzata la differenza fra il livello del segnale ed il livello di tale rumore (rapporto S/R), il quale difficilmente sarà contenibile sotto i 30–35 dB,

– *distanza sorgente–ricevitore*, per una sorgente puntiforme l’attenuazione da divergenza sferica dell’onda sonora è di 6 dB per ogni raddoppio della distanza,

– *assorbimento acustico* lungo la linea di propagazione, l’assorbimento da parte del pubblico e delle poltrone per un’onda sonora radente è elevato soprattutto alle basse frequenze, ma diminuisce con l’inclinazione del piano di appoggio delle poltrone, di qui l’opportunità di aumentare tale inclinazione.

Quest’ultimo accorgimento favorisce anche la visibilità del palcoscenico. Tenendo conto di tutti questi fattori, normalmente la distanza massima accettabile tra sorgente e ricevitore si aggira sui 25–30 metri per la voce umana non amplificata e sui 45–50 metri per la musica.

### 1.3 Il campo acustico riflesso

Le prime riflessioni che si verificano sulle superfici presenti nell’ambiente possono essere utili a rafforzare il livello del suono diretto, migliorando l’intelligibilità della parola e la qualità della musica, oppure dannose. Il primo caso si verifica quando il tempo di ritardo dell’onda riflessa rispetto a quella diretta e la differenza tra i rispettivi livelli non superano certi valori; in caso contrario può verificarsi un eccessivo prolungamento della coda sonora o addirittura il fenomeno dell’eco: onda diretta ed onda riflessa vengono percepite separatamente come due suoni distinti. Questo avviene quando il contenuto energetico del suono riflesso è almeno il 10% di quello del suono diretto ed il tempo di ritardo supera i 50 millisecondi nel caso del parlato, ed i 75 millisecondi nel caso della musica. Assumendo una velocità del suono di 340 m/s, tali tempi di ritardo corrispondono a differenze di percorso tra le due onde rispettivamente di 17 e 25 metri. Per i valori anzidetti è più esatto parlare di eco ravvicinato, mentre l’eco vero e proprio si verifica per ritardi superiori al decimo di secondo.

Il tempo iniziale di ritardo, *Initial Time Delay Gap* (ITDG), che rappresenta il tempo di ritardo della prima riflessione, è uno degli indici di valutazione oggettivi della qualità acustica di una sala .

Si ricorda che, affinché una superficie dia luogo ad una riflessione speculare del suono, le sue asperità o rientranze devono essere inferiori ad un quarto della lunghezza d'onda del suono incidente, e la lunghezza dei suoi lati non deve essere inferiore al quadruplo della stessa lunghezza d'onda in caso contrario, sempre che la superficie sia riflettente, si avrà una riflessione diffusa.

Conseguentemente, se si ricorda che le lunghezze d'onda relative alle frequenze udibili variano da un minimo di circa 2 centimetri per un tono di 16.000 Hz ad un massimo di circa 17 metri a 20 Hz (una ventina di metri per una frequenza di 16 Hz), si comprende che una stessa struttura può comportarsi in modo speculare nei confronti di certe frequenze e diffondente nei confronti di altre.

Queste riflessioni selettive possono dar luogo alla cosiddetta distorsione in frequenza: il segnale sonoro che giunge all'ascoltatore non ha la stessa composizione tonale, ovvero lo stesso spettro, di quello emesso dalla sorgente.

È anche opportuno che le prime riflessioni arrivino all'ascoltatore da direzioni diverse da quella della sorgente, in tal modo la percezione contemporanea del suono diretto e del suono riflesso provoca stimoli diversi alle due orecchie dando luogo alla cosiddetta *sensazione spaziale* o *impressione spaziale* legata alle caratteristiche fisiche della sala considerata. Tale definizione comprende sia la possibilità di localizzare la sorgente, cosa importante soprattutto nelle rappresentazioni teatrali, sia la sensazione di trovarsi immersi in un campo sonoro tridimensionale in cui il suono arriva da più direzioni (sensazione di avvolgimento).

Sono stati definiti alcuni indici di valutazione oggettivi connessi a tale sensazione soggettiva, quali l'*Efficienza Laterale* (LE) e la funzione di *correlazione mutua interaurale* (inter aural cross correlation IACC). Il primo indice è dato dal rapporto fra l'energia che arriva lateralmente all'ascoltatore nel periodo che va dai 25 agli 80 ms successivi ad un segnale impulsivo (ad esempio un colpo di pistola), e l'energia totale che gli arriva nei primi 80 ms. Il secondo indice tende a quantificare la sensazione dovuta alla differenza fra le pressioni sono-

re che giungono alle due orecchie; essa assume valore nullo quando non c'è differenza di stimolo, cosa che si verifica nel caso di solo suono diretto che giunge frontalmente od in caso di campo sonoro simmetrico rispetto all'ascoltatore.

Oltre alle prime riflessioni esistono anche le riflessioni successive che hanno la loro importanza nel determinare la qualità acustica della sala, esse danno luogo alla cosiddetta coda sonora, vale a dire al prolungamento del suono diretto, alla sua permanenza nell'ambiente dopo l'interruzione dell'emissione.

L'entità di questo prolungamento è misurata da un descrittore fisico: il *tempo di riverberazione* (RT), definito dall'architetto statunitense *Sabine* già alla fine dell'Ottocento come il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisse di 60 Decibel.

Il valore di questo parametro è funzione del volume della sala e dell'assorbimento totale delle sue superfici interne, dal momento che l'assorbimento dei materiali varia con la frequenza, anche il RT va calcolato alle varie frequenze. A parità di forma della sala il RT aumenta linearmente all'aumentare delle dimensioni. Nel caso delle sale per concerti è desiderabile un prolungamento della coda sonora senz'altro maggiore che per altre tipologie di auditoria, il suono non deve essere troppo "secco", ovvero la coda sonora non deve essere troppo corta. L'entità ottimale del tempo di riverberazione varia con i generi musicali e con le dimensioni della sala: è massima per la musica medioevale ed i concerti d'organo (2–4 s), minore per l'opera (1.6–2.0 s), la musica classica (circa 1.8 s) e barocca (minore di 1.5 s), è bene sia inferiore al secondo per l'ascolto del parlato. Un altro parametro di valutazione basato sullo stesso concetto è l'*Early Decay Time* (EDT), ovvero il tempo necessario affinché, dopo l'interruzione dell'emissione sonora da parte di una sorgente, il livello di pressione sonora nella sala diminuisca di 10 Decibel.