

**2° CAPITOLO**

**TECNICHE DI MISURA**

## 2.1 Le misure acustiche

Sono state descritte nel capitolo precedente le teorie sviluppate sino ad oggi per la descrizione e la valutazione del campo acustico negli ambienti chiusi.

L'evoluzione di queste teorie è intimamente legata ai progressi che si sono succeduti nelle tecniche di misurazione delle grandezze studiate, cosicché è ora opportuno passare brevemente in rassegna, per ognuna di esse, quali strumenti e quali procedure possono venire impiegati.

E' bene anzitutto suddividere le misure in 4 grandi settori, legati a 4 distinti aspetti del fenomeno sonoro:

- 1) Misure del livello sonoro
- 2) Misure del tempo di riverberazione
- 3) Misure della distribuzione temporale dell'energia sonora
- 4) Misure della spazialità del campo acustico.

Questa divisione ripercorre, anche in senso storico, il successivo raffinarsi delle tecniche e delle teorie.

Infatti prima di Sabine, cioè nel secolo scorso, era possibile misurare soltanto il livello sonoro in vari punti della sala, ed in modo piuttosto approssimativo.

Le misure del tempo di riverberazione sono state rese

possibili dal registratore scrivente di livello, mentre le misure della distribuzione temporale di energia sonora richiedono un oscillografo, che è stato impiegato solo a partire dagli anni '30.

Le misure del grado di spazialità del campo acustico sono infine state possibili solo di recente, quando sono divenute disponibili raffinate tecniche digitali, e microfoni dalle particolari caratteristiche direttive.

Nei successivi paragrafi verranno dunque esaminate tutte le possibili tecniche di misura sino ad oggi sviluppate.

## 2.2 Misure di livello

La misura del livello sonoro é basata sull' uso di trasduttori acustico-elettrici, solitamente rappresentati da microfoni: si tratta di apparecchi ove una sottile membrana viene messa in movimento dalle fluttuazioni di pressione dell' aria, e questo movimento produce, secondo diversi meccanismi, un segnale elettrico direttamente proporzionale alla pressione istantanea  $p'(t)$  del campo acustico.

Esistono vari tipi di microfoni, basati su differenti dispositivi per tradurre il movimento della membrana in segnale elettrico. Citiamo qui brevemente i tipi dinamici, piezoelettrici, a carbone, a condensatore. Questi ultimi sono oggi largamente i piú usati per le misure acustiche, poiché forniscono la migliore linearità in frequenza, ed hanno una calibratura costante nel tempo.

Il funzionamento dei microfoni a condensatore é molto semplice: la membrana é ricoperta di un sottile strato metallico, e si trova in prossimitá di una lamina rigida che funge da seconda armatura. Viene mantenuta una differenza di potenziale fra le due armature, mediante un apposito alimentatore. Quando la membrana si muove, varia la capacitá del condensatore, e pertanto circola una corrente che tende a riportare la differenza di potenziale

al valore preesistente. E' questa piccola corrente che, amplificata, produce il segnale elettrico proporzionale alla deflessione della membrana, e dunque alla pressione sonora. Questo tipo di microfoni manifesta una grande linearità non solo rispetto alla frequenza, ma anche rispetto all' ampiezza del segnale acustico, poiché il fattore di proporzionalità fra corrente e pressione rimane costante con variazioni di pressione sonora enormi.

Il segnale proveniente dal microfono rappresenta il valore istantaneo della pressione sonora, della quale viene calcolato il valore medio efficace mediante un circuito elettronico di pesatura R.M.S. (Root Mean Squared). L' espressione del valore medio efficace è la seguente:

$$p_{me} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) \cdot dt} \quad (2.1)$$

Anche il valore pesato R.M.S. tende però ad essere troppo variabile nel tempo, se il tempo T di integrazione è ridotto; si adottano dunque circuiti con costanti di tempo relativamente elevate, dell' ordine di 0.35 secondi

("fast") e di 1 secondo ("slow"). In questo modo è possibile avere una indicazione su uno strumento a lancetta, che altrimenti non sarebbe in grado di seguire il rapido succedersi della fluttuazione. L'uso della costante di tempo più lunga diviene indispensabile quando il segnale sonoro è molto variabile (musica o parlato).

In genere si esegue una mappatura del livello sonoro in una sala azionando una sorgente di rumore di potenza costante, e muovendosi con l'apparato di misura (fonometro) nei vari punti dell'ambiente.

Il livello sonoro non viene misurato direttamente dal valore della pressione sonora, poiché essa varia in intervalli troppo ampi; poiché l'orecchio umano risponde almeno approssimativamente alla legge logaritmica di Fechner (come in pratica gli altri sensi umani), si adotta una scala logaritmica, definita dalla relazione:

$$L_p = 20 \cdot \log \left( \frac{\bar{p}}{\bar{p}_{117}} \right) \quad ( 2.2 )$$

ove  $\bar{p}_{117}$  è il valore di soglia a 1000 Hz, cioè la più

piccola pressione sonora in grado di essere avvertita dall' orecchio umano medio; essa vale  $20 \cdot 10^{-6}$  Pascal.

Il livello di pressione sonora  $L_p$  è dunque valutato in scala logaritmica, espresso quindi da un numero privo di dimensioni: si indica questo apponendo il simbolo dB (decibel) dopo il valore numerico del livello stesso.

E' possibile ricondurre la sensibilità dello strumento, rispetto alle diverse frequenze, alla sensibilità media dell' orecchio umano : ciò avviene mediante un apposito circuito di pesatura elettronico, chiamato "filtro A", incorporato nella maggior parte dei fonometri. Nella fig. 2.1 è visibile la curva di risposta in frequenza del filtro A standardizzato. Se la misura è stata eseguita con il filtro A, il livello viene espresso in dB(A) (decibel-A).

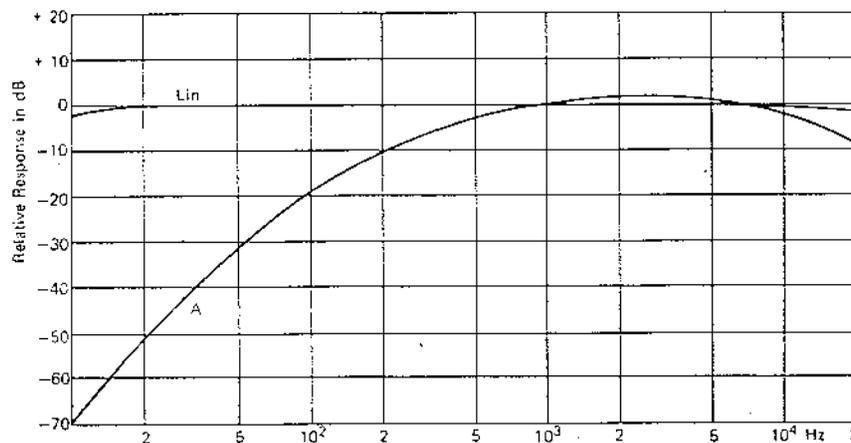


Fig. 2.1: Curva di ponderazione "A".

La misura del livello sonoro in dB(A) é ormai internazionalmente riconosciuta come la piú rappresentativa della reale sensazione sonora ricevuta tramite l' orecchio umano.

E' tuttavia possibile raffinare ulteriormente la misura effettuando una analisi in frequenza del suono ricevuto, per controllare che le riflessioni sulle pareti della sala non ne modifichino lo spettro sonoro. L' analisi in frequenza richiede l' utilizzo di un banco di filtri, solitamente ad ampiezza di banda proporzionale alla frequenza di centro banda: sono state standardizzate internazionalmente le frequenze di centro banda per analisi in ottave (ogni banda ha frequenza di centro banda doppia della precedente) e in terzi d' ottava (ogni ottava é suddivisa in tre terzi). Ovviamente l' analisi in terzi d' ottava fornisce una migliore risoluzione in frequenza.

Molti fonometri oggi incorporano filtri per l' analisi in ottave o in terzi d' ottava, ma con essi la procedura di misura é discretamente lunga, poiché occorre ripetere la misura per ogni filtro selezionato.

Sono pertanto apparsi sul mercato analizzatori in "tempo reale", che forniscono su schermo TV la rappresentazione grafica dei livelli sonori di tutte le bande di frequenza. In figura 2.2 é visibile la stampa dell' immagine prodotta da uno di questi analizzatori.

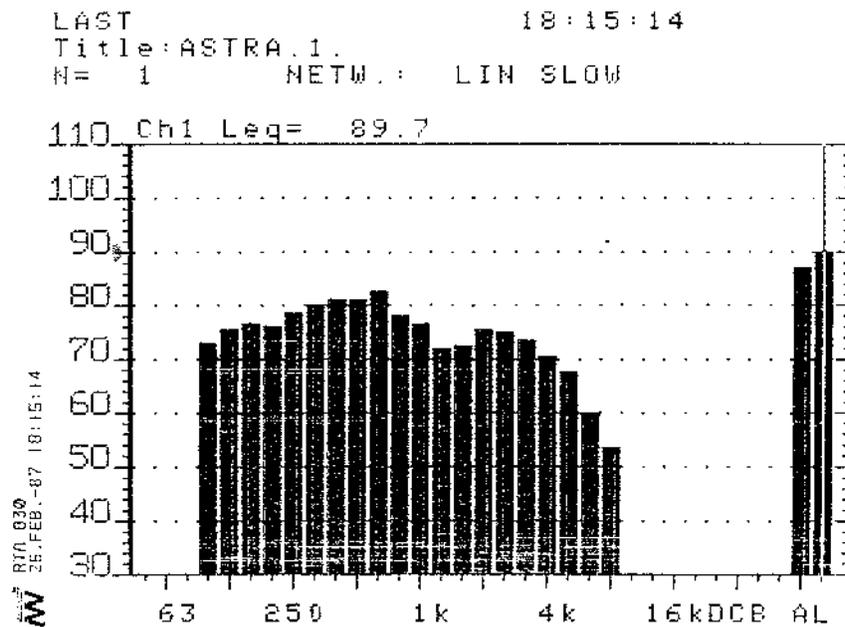


Fig. 2.2: Spettro sonoro in terzi d'ottava.

Per operare correttamente l'analisi della risposta in frequenza di un ambiente, è necessario che la sorgente sonora emetta un suono dotato di eguale potenza in ogni banda dello spettro: questo particolare suono è chiamato "rumore rosa". Di fatto però l'amplificatore e l'altoparlante distorcono sempre il segnale emesso, per cui, volendo ottenere risultati precisi, occorre avere a disposizione uno strumento bicanale, in grado di sottrarre lo spettro in frequenza della sorgente dallo spettro ricevuto nel punto di ascolto.

Un diverso modo di operare è basato sull' utilizzo degli analizzatori di Fourier: essi sono strumenti in grado di operare la Trasformata di Fourier su un segmento del segnale proveniente dal microfono, producendo uno spettro non più frazionato in bande di frequenza, ma uno spettro continuo, con una scala delle frequenze lineare. In fig. 2.3 è visibile la riproduzione grafica dell' immagine visualizzata sullo schermo di un analizzatore di Fourier. In questo caso è necessario operare con una sorgente sonora che emetta uguale potenza in ogni banda di frequenza di ampiezza costante (ad es. di 1 Hz), e non più in bande di ampiezza variabile come nel caso precedente. Il suono così prodotto viene detto "rumore bianco".

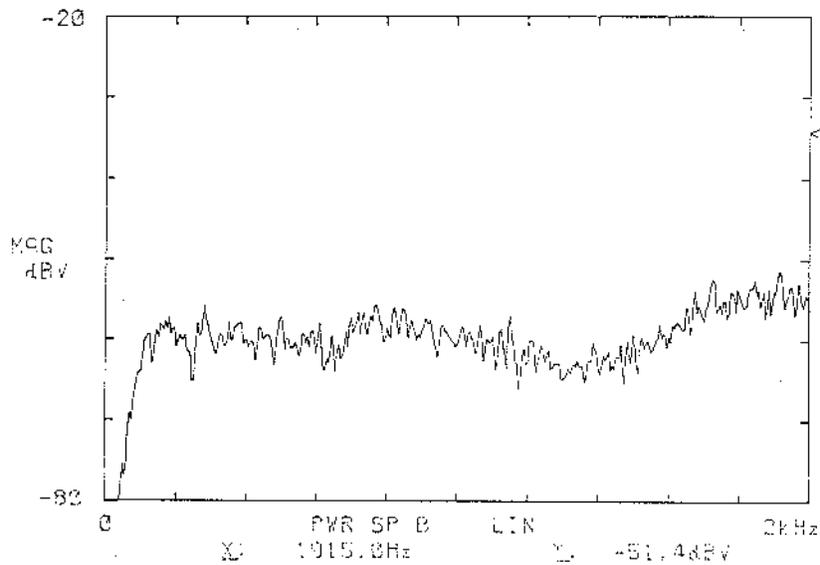


Fig. 2.3: Spettro sonoro in banda stretta.

Anche in questo caso é possibile rendere molto piú precisa la misura, se si dispone di un analizzatore bicanale che sottrae lo spettro della sorgente da quello ricevuto dal microfono. Questo modo di procedere é particolarmente utile, poiché l'analisi di Fourier fornisce non solo l'ampiezza relativa del segnale microfonico rispetto alla sorgente, ma anche lo sfasamento relativo in gradi.

E' interessante notare come lo spettro di un rumore rosa, ottenuto da una analisi di Fourier, non é piatto, ma decresce linearmente con la frequenza. Reciprocamente, lo spettro del rumore bianco, visualizzato da un analizzatore in ottave o terzi d'ottava, é crescente con la frequenza con una pendenza di 3 dB per ottava.

Entrambi i tipi di analizzatori suddetti hanno la possibilitá di calcolare, dallo spettro ottenuto, il corrispondente livello complessivo in dB ed in dB(A).

Le misure di livello sonoro su esposte hanno lo scopo di controllare la uniformitá di distribuzione dell'energia nel campo acustico e la mancanza di evidenti effetti di distorsione in frequenza del segnale originale. E' poi chiaro che l'effettivo livello udibile in ogni punto durante la esecuzione musicale dipende direttamente dalla potenza sonora emessa dagli strumenti musicali o dalla voce umana. Anche la potenza sonora  $W$  viene misurata

nella scala dei dB, mediante una relazione del tipo:

$$L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_{r1r}} \right) \quad ( 2.3 )$$

ove  $L_w$  è appunto il livello di potenza, misurato in dB, e  $W_{r1r}$  è la potenza sonora di riferimento, pari a  $10^{-12}$  Watt.

Avendo dunque misurato i livelli sonori in un ambiente,  $L_{p1}$ , mentre era in azione una sorgente sonora di potenza  $L_{w1}$ , si possono prevedere i nuovi livelli sonori prodotti da un' altra sorgente di potenza  $L_{w2}$ , che saranno semplicemente pari a  $L_{p2} = L_{p1} - L_{w1} + L_{w2}$ .

Non sono purtroppo prevedibili con grande precisione le potenze sonore emesse dalle principali sorgenti utilizzate nei teatri, poiché ad esempio una orchestra può variare notevolmente di composizione, e gli orchestrali stessi possono variare entro certi limiti la potenza emessa; ancora maggiore variabilità presenta la voce umana. Pertanto non è possibile prevedere l' effettivo livello di ascolto. E' tuttavia un dato importante la "sonorità" dell' ambiente, intesa come la capacità di

produrre un elevato livello sonoro in seguito all' emissione di una piccola potenza: essa si esprime solitamente in modo convenzionale come il livello di ascolto che si avrebbe se la sorgente avesse un livello di potenza di 100 dB.

In genere i musicisti, i cantanti e gli attori avvertono spontaneamente la sonorità dell' ambiente, e regolano istintivamente la potenza sonora emessa in modo da produrre il giusto livello sonoro di ascolto. Essi tuttavia ricevono questa sensazione dal "ritorno" di energia sonora da parte della sala, che non sempre è legato all' effettivo livello ricevuto dagli spettatori. L' analisi della uniformità di distribuzione del campo sonoro deve dunque estendersi anche al palcoscenico ed alla zona dell' orchestra, ed in particolare al posto normalmente occupato dal Direttore, da cui dipende l' amalgamarsi del suono dei vari strumenti.

I dati ottenuti dalle misure suddette vengono usualmente presentati in forma grafica, come mappatura dei livelli con diversi gradi di annerimento o come curve di decremento in funzione della distanza dalla sorgente. In fig. 2.4 sono visibili queste due tipiche rappresentazioni.

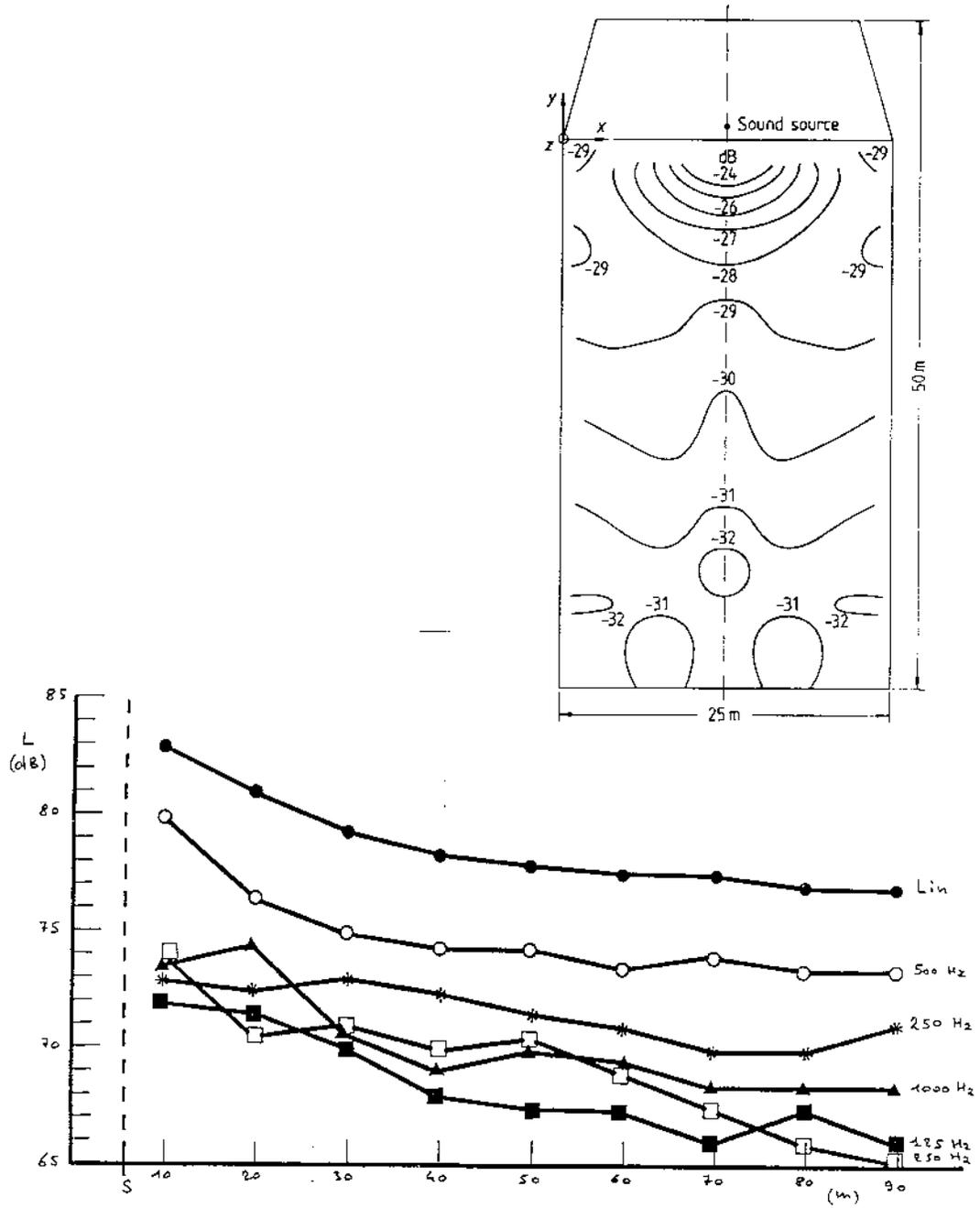


Fig. 2.4: Mappa di livello sonoro e curve di decremento.

Dall'analisi di queste mappe, ottenute nelle migliori sale da concerto del mondo, si nota che le condizioni più gradite sono rappresentate da un campo acustico di distribuzione uniforme e diffusa, privo di attenuazioni o risonanze a particolari frequenze.

Viste le modalità di misura standardizzate, è possibile confrontare senza problemi i risultati di livello sonoro ottenuti da tutti gli studiosi, senza correre rischi di comparare dati incongruenti, come purtroppo può accadere con le altre grandezze acustiche.

### 2.3 Misure di Riverberazione

Le misure di riverberazione furono introdotte da Sabine, il quale definì così il Tempo di Riverberazione  $T$  (detto anche "durata convenzionale della coda sonora"): ammesso che in un ambiente sia in funzione una sorgente sonora, tale da produrre un certo livello di pressione sonora a regime  $L_p$ , si interrompa il funzionamento della sorgente; il Tempo di Riverberazione è il tempo impiegato dal livello sonoro a ridursi di 60 dB rispetto al valore precedente allo spegnimento della sorgente.

La definizione data da Sabine non esplicita esattamente l'istante dal quale si inizia a misurare il Tempo di Riverberazione: infatti la intensità sonora non inizia a decadere immediatamente, ma solo dopo un certo tempo, pari al tempo impiegato dall'onda sonora diretta a raggiungere il punto di ascolto. Detta  $r$  la distanza in metri tra sorgente e punto di ascolto, e detta  $c$  la velocità del suono (pari a circa 340 m/s), l'intensità inizia dunque a decadere solo dopo  $r/c$  secondi (che non vanno dunque considerati nel Tempo di Riverberazione).

Notando che per un'onda progressiva la densità di energia sonora, definita come l'energia sonora contenuta nell'unità di volume, è proporzionale al quadrato della pressione sonora, si osserva che un decadimento di 60 dB

corrisponde ad una riduzione della densità sonora ad un milionesimo del valore preesistente.

La misura del decadimento di livello non è però attuabile con il fonometro, poiché esso è usualmente piuttosto rapido: si collega dunque un registratore scrivente al misuratore di livello, ed in questo modo si ottengono dei tracciati quali quello riportato in fig. 2.5. . Variando la velocità di trascinamento della carta si varia la scala dei tempi della registrazione, e di ciò bisogna tener conto per la determinazione del Tempo di Riverberazione dalla pendenza della linea di decadimento. Ciò può essere fatto facilmente grazie all' uso di uno speciale goniometro, che fornisce direttamente il risultato voluto. In fig. 2.6 si può vedere la tipica strumentazione per questo tipo di misure, sostanzialmente simile a quella stessa usata da Sabine all' inizio del secolo.

Utilizzando il filtro di pesatura "A", o i filtri in ottave, di cui sono dotati i fonometri, è possibile misurare tempi di riverberazione diversi, indicati solitamente con  $T_{sub}$  (pesato A) e  $T_{1es}$ ,  $T_{2es}$ , etc. (in ottave); il numero a pedice indica la frequenza di centro ottava.

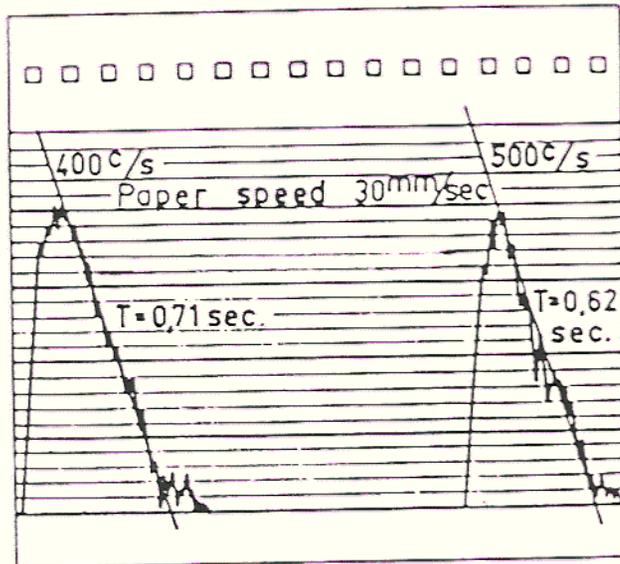


Fig. 2.5: Tracciati di decadimento di un rumore impulsivo

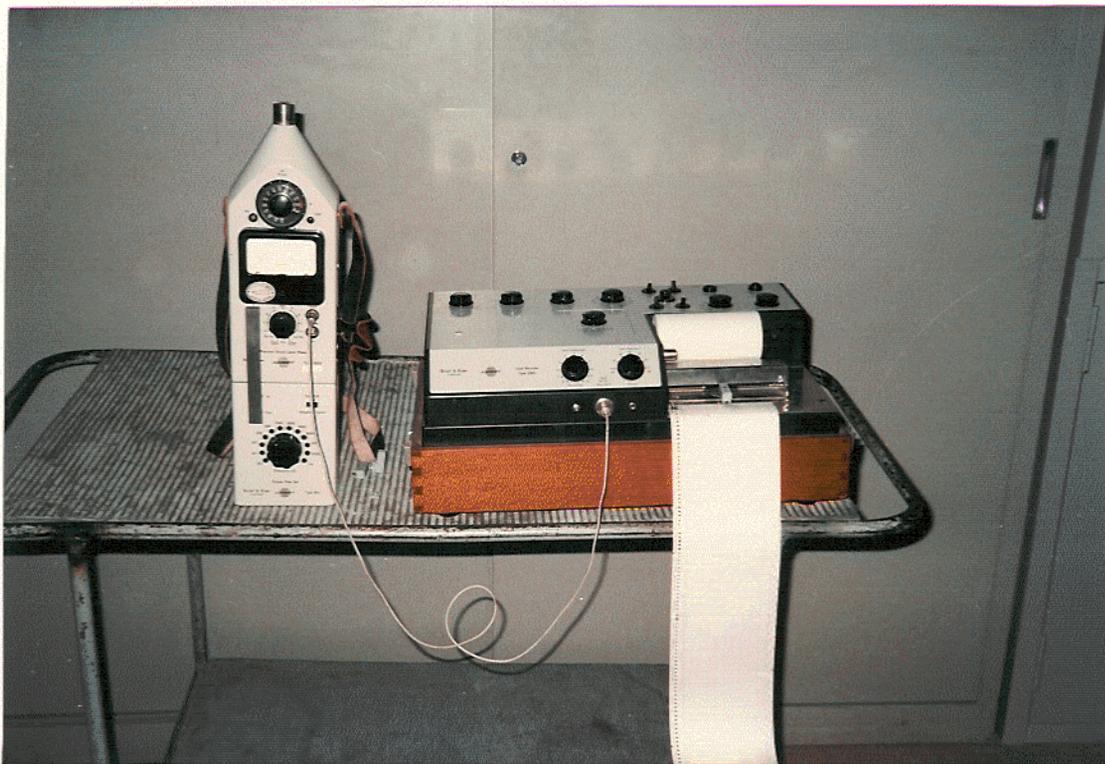


Fig. 2.6: Apparato sperimentale per la registrazione dei decadimenti sonori.

Oggi si misurano anche tempi di riverberazione in terzi d'ottava, ma questi dati non trovano per ora riscontro nei dati sui tempi di riverberazione giudicati ottimali, che sono disponibili solo in ottave. Analogamente non è possibile prevedere tempi di riverberazione in terzi d'ottava tramite la formula di Sabine (o i suoi derivati), poiché sarebbe necessario conoscere per terzi d'ottava il valore del coefficiente di assorbimento apparente dei materiali di cui è ricoperto lo' ambiente.

Spesso non è possibile ricavare il tempo di riverberazione dalla definizione di Sabine, poiché non si riesce a registrare un decadimento di 60 dB; infatti se è presente rumore di fondo, sarebbe necessario utilizzare una sorgente in grado di sovrastare il rumore di oltre 60 dB, il che spesso è inattuabile. Si ricorre pertanto ad una estrapolazione, usualmente grafica, della prima parte della curva di decadimento. In teoria, se il decadimento fosse esattamente esponenziale, come previsto dalla acustica statistica, la curva del livello sarebbe una retta con pendenza costante, e l'extrapolazione non porterebbe ad alcun errore. Nella realtà capita spesso di vedere curve di decadimento tutt'altro che rettilinee, con doppie pendenze o curvature non trascurabili. Ecco che il risultato è influenzato dall'estensione in dB o in ms

del tratto iniziale di curva usato per l' estrapolazione. Usualmente si riconosce come Tempo di Riverberazione Classico, direttamente rapportabile alla definizione di Sabine, il valore ottenuto estrapolando il decadimento da -5 dB a -35 dB sotto il livello di regime. Vengono poi definiti altri Tempi di Riverberazione, facenti riferimento a porzioni ridotte di decadimento: Kurer e Kurze [47] hanno definito un Tempo di Riverberazione Iniziale ANZ (Anfangsnachhallzeit), ottenuto dalla estrapolazione della curva da 0 a -20 dB; Atal, Schroeder e Sessler [48] hanno anch' essi definito un Tempo di Riverberazione Iniziale (IRT), basato sui primi 15 dB di decadimento, mentre Jordan [49] ha definito il Tempo di Primo Decadimento EDT (Early Decay Time), basato sui primi 10 dB. Gli stessi Atal, Schroeder e Sessler, nel lavoro già citato, utilizzarono un tempo di primo decadimento basato sui primi 160 ms della curva. I primi tre Tempi Iniziali sono indicati solitamente con i simboli  $T_{20}$ ,  $T_{15}$ ,  $T_{10}$ , ed il piú usato é il terzo, cioè l' EDT di Jordan. Questi Tempi Iniziali sono piú correlati all' effettiva sensazione di riverberazione prodotta nell' orecchio umano di quanto lo sia il Tempo di Riverberazione Classico.

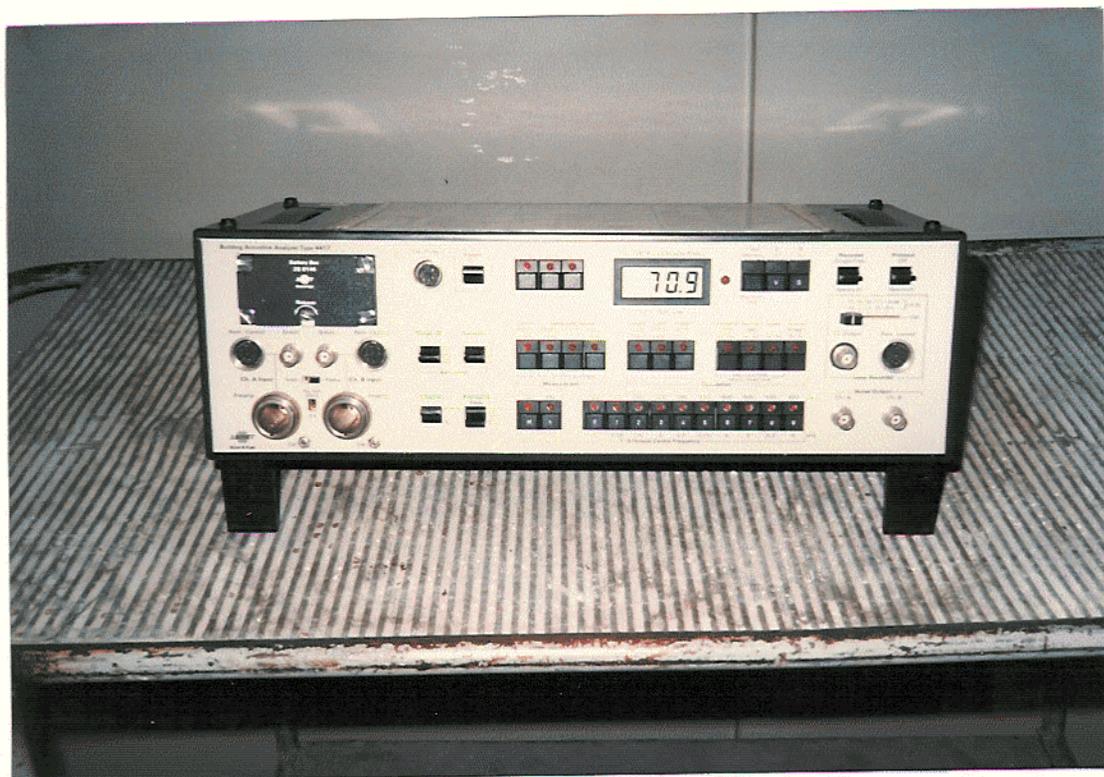


Fig. 2.7: Strumentazione per analisi in terzi d'ottava dei tempi di riverberazione.

Oltre alla classica strumentazione con registratore scrivente, sono state sviluppate apparecchiature dedicate alla misurazione diretta dei tempi di riverberazione; ad esempio in figura 2.7 è visibile uno strumento di questo tipo, che consente di misurare i tempi di riverberazione in bande di 1/3 di ottava e con estrapolazione su 20, 30 o 40 dB. L'uso di questi strumenti è del tutto automatizzato, poiché essi provvedono ad alimentare la sorgente con un opportuno segnale (già filtrato in terzi d'ottava, in modo da concentrare l'energia sonora in un ristretto campo di frequenza, migliorando così il rapporto

segnale/disturbo), provvedono ad interrompere il segnale stesso al momento opportuno, valutano direttamente la pendenza del decadimento e memorizzano il Tempo di Riverberazione così ottenuto; dopo aver analizzato tutte le bande di frequenza si ottiene una stampa dei tempi misurati in forma tabellare. E' possibile così ottenere risultati indipendenti dall'operatore e molto ripetibili, specie se ottenuti su medie di più rilevamenti, con grande riduzione del tempo necessario per le misure.

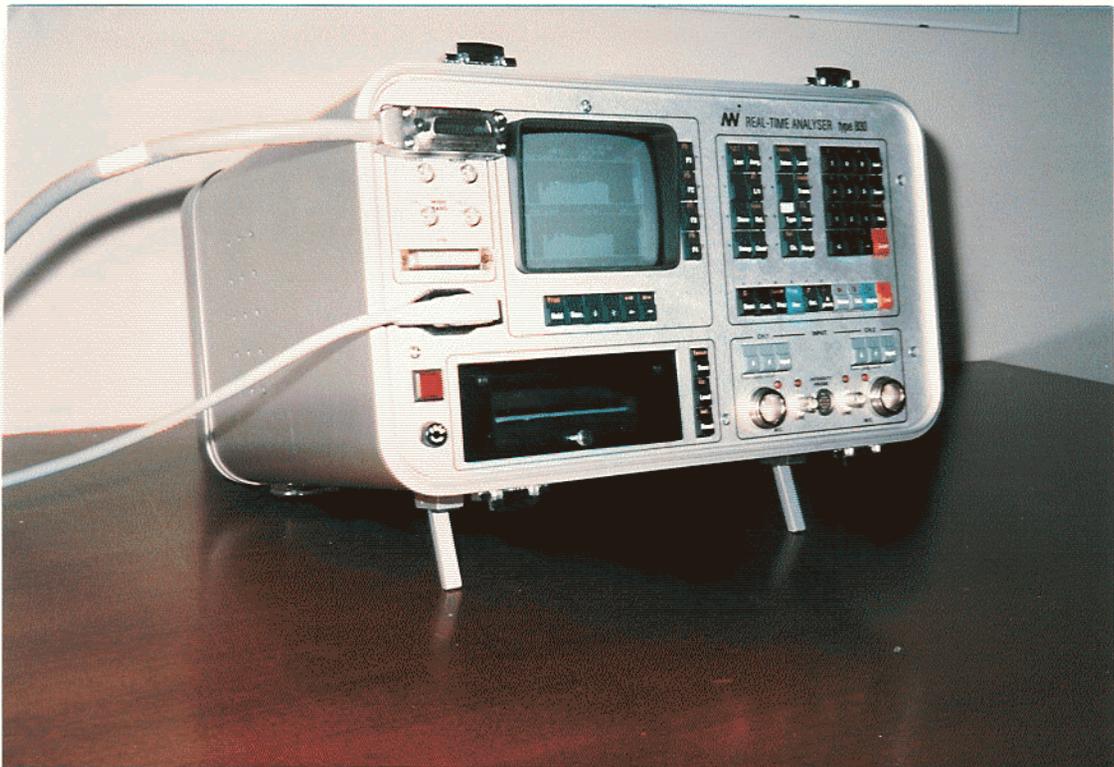


Fig. 2.8: Analizzatore di frequenza in tempo reale.

Una ulteriore considerevole riduzione di tempo é conseguibile utilizzando analizzatori in tempo reale, che sono in grado di processare simultaneamente tutte le diverse bande di frequenza. In questo caso la sorgente sonora viene alimentata con rumore rosa, e ciò penalizza leggermente le condizioni di misura poiché la potenza viene dispersa su tutte le frequenze, ed il rapporto segnale/disturbo si riduce. E' però possibile ovviare allo inconveniente aumentando la potenza della sorgente, ovvero riducendo l' intervallo in dB su cui estrapolare la pendenza; si può anche ridurre il numero delle bande di frequenza. In fig. 2.8 é visibile uno strumento di questo tipo, che incorpora anche una unità a minidisco sulla quale possono venire memorizzate le curve di decadimento per successive elaborazioni e confronti.

In tutti gli strumenti considerati sinora la base del calcolo é un processo di interpolazione grafica, che presuppone un decadimento piú o meno lineare. Per cercare di rendere le curve di decadimento piú facilmente interpolabili, si ricorre solitamente ad uno "smussamento" (in inglese "smoothing") dei segnali; nel caso del registratore scrivente ciò é ottenuto tramite la regolazione della costante di tempo del circuito di pesatura R.M.S., cui deve corrispondere una adeguata velocità di scrittura del pennino del registratore.

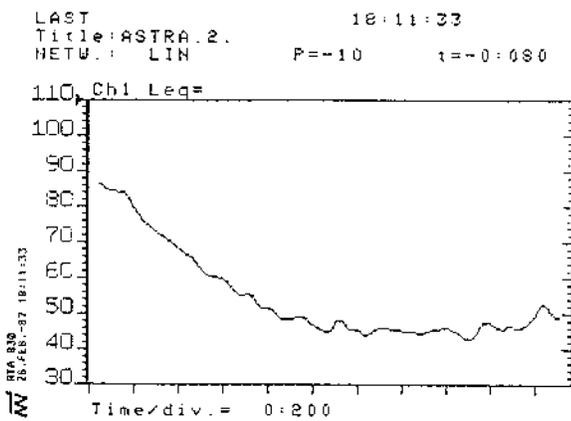
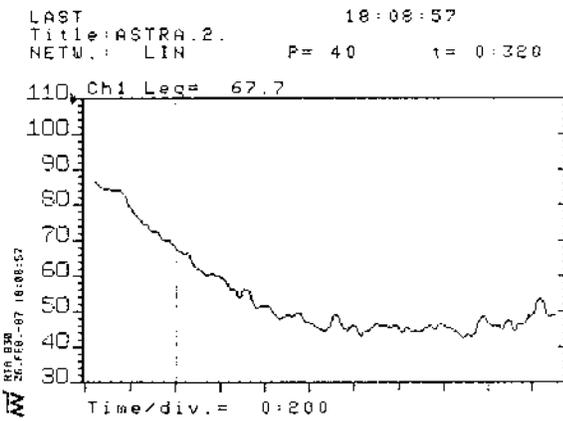
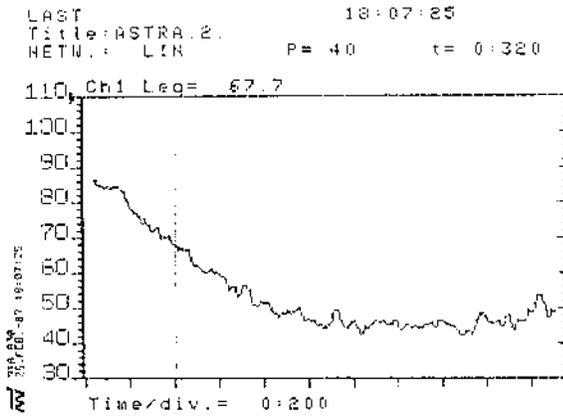


Fig. 2.9: Effetto dello "smoothing" sulle curve di decadimento.

Nel secondo tipo di strumento lo smoothing viene effettuato automaticamente sul segnale d'ingresso prima della elaborazione, in modo non influenzabile dallo operatore. Infine nell'analizzatore in tempo reale è possibile effettuare una elaborazione digitale della curva di decadimento, prima di calcolare da essa i tempi di riverberazione, mediante un semplice algoritmo di interpolazione fra i punti adiacenti della curva stessa; ripetendo un certo numero di volte la interpolazione, si può smussare la curva a piacimento, come mostrato dalle successive stampe riportate in fig. 2.9.

Una diversa possibilità è offerta dall'uso di analizzatori di Fourier: questi strumenti usualmente non sono corredati del software necessario per il calcolo del Tempo di Riverberazione, ed è pertanto necessario interfacciarli con un microcomputer opportunamente programmato. In questo modo si può utilizzare qualsiasi algoritmo per il calcolo della pendenza delle curve di decadimento, è possibile misurare tempi di riverberazione in bande di frequenza anche molto piccole, prefissare intervalli di interpolazione in dB o in millisecondi. Si paga questa grande libertà operativa in termini di scarsa confrontabilità dei risultati ottenuti con quelli degli altri strumenti più classici, con i quali è stata ottenuta la gran parte dei dati di raffronto oggi disponibili.

E' stata sinora considerata l' idea iniziale di Sabine, cioè una sorgente che produce un campo sonoro stazionario e diffuso, interrotta improvvisamente. In effetti spesso viene utilizzata una sorgente di tipo impulsivo, quale un colpo di pistola a salve, lo scoppio di un palloncino, o un impulso inviato ad un altoparlante.

Questi suoni producono decadimenti usualmente più rapidi di quelli prodotti dalla sorgente a regime, ed i tempi di riverberazione misurati sono dunque leggermente inferiori. Alcuni strumenti, come l' analizzatore in terzi d' ottava di fig. 2.8, sono in grado di elaborare le curve di decadimento prodotte da rumori impulsivi in modo diverso da quelle prodotte da suoni a regime, utilizzando una tecnica numerica sviluppata da Schroeder [50], e ricostruendo in tal modo la curva di decadimento che sarebbe stata prodotta da una sorgente in funzionamento continuo. Questa tecnica deriva direttamente dalla misurazione della Risposta all' Impulso, descritta nel prossimo paragrafo, e verrà pertanto colà illustrata.

## 2.4 Misure di Distribuzione Temporale

Il Tempo di Riverberazione costituisce senza dubbio il primo e piú importante parametro oggettivo da determinare in un ambiente chiuso, sia esso destinato allo ascolto della parola o della musica. Tuttavia esso da solo non rende conto delle diversitá della sensazione uditiva riscontrabili fra diverse sale con lo stesso Tempo di Riverberazione, o addirittura fra punti diversi della stessa sala, poiché dá informazioni solo sul decadimento di tipo statistico-esponenziale, che si verifica dopo un certo intervallo dall' arrivo del suono diretto; in questo intervallo giungono all' orecchio, distinte una dalla altra, le prime riflessioni prodotte dalle pareti, dal soffitto e dal pavimento.

L' importanza di queste prime riflessioni é giá stata messa in luce nel precedente capitolo; la determinazione delle caratteristiche di distribuzione temporale della energia sonora riveste dunque una importanza predominante nella valutazione della qualitá acustica.

E' possibile rappresentare con un diagramma l' effetto delle riflessioni multiple in un ambiente chiuso: si assume come ascissa il tempo, con un intervallo di circa 200-250 ms. Si riportano poi in ordinata le pressioni

sonore, corrispondenti all' arrivo sul microfono della onda diretta e delle onde riflesse successive, nella ipotesi che la sorgente sonora generi la cosiddetta "funzione delta di Dirac", ovvero un impulso unitario positivo di pressione, di durata temporale nulla.

L' onda diretta e le successive riflessioni sono rappresentate da segmenti verticali positivi, di altezza ridotta rispetto all' unità, posizionati al tempo di ritardo corrispondente. In fig. 2.10 è visibile un diagramma teorico di questo tipo, chiamato usualmente Reflectogramma, o Risposta all' Impulso Teorica; esso può essere costruito mediante la individuazione delle sorgenti virtuali (immagini speculari della sorgente reale prodotte dalle pareti della sala), e calcolando i tempi di ritardo in base alla distanza fra sorgente (reale o virtuale) e posizione microfonica, mentre l' ampiezza è inversamente proporzionale alla distanza e risente della attenuazione prodotta dalla riflessione sulle pareti.

Usualmente il diagramma viene disegnato con l' onda diretta di altezza unitaria, indipendentemente dalla distanza dalla sorgente, e con le successive riflessioni rapportate in scala ad essa.

Esiste una Risposta all' Impulso diversa in ogni diverso punto dell' ambiente, assegnata una particolare posizione della sorgente; variando quest' ultima, si

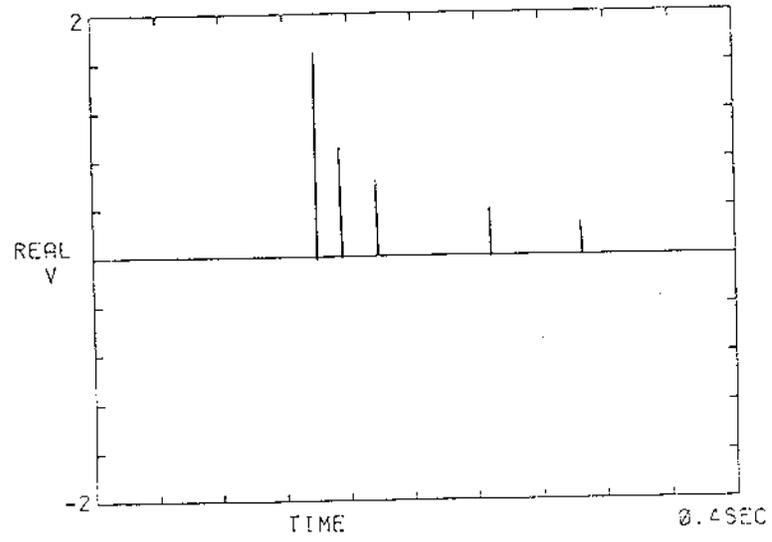


Fig. 2.10: Risposta all' impulso teorica.

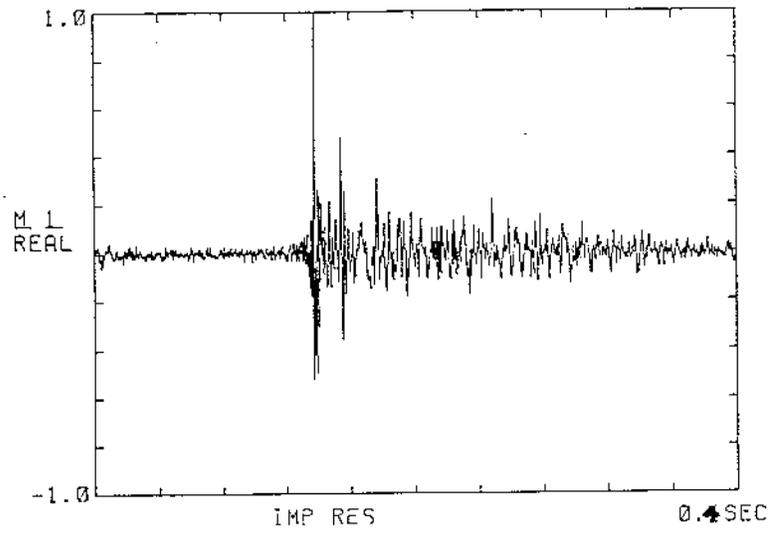


Fig. 2.11: Risposta all' impulso effettiva.

modificano in varia misura le risposte all' impulso di tutti i punti della sala.

Oltre al calcolo teorico citato, è possibile ottenere Reflectogrammi sperimentali in ambienti esistenti. La procedura più classica, entrata nell' uso già prima della ultima guerra mondiale, consiste nel visualizzare su un oscilloscopio il segnale elettrico prodotto da un microfono, in risposta ad una sollecitazione di tipo impulsivo prodotta da una apposita sorgente, tipicamente un colpo di pistola (anche se possono essere usati scoppi di palloni, scintille, appositi altoparlanti, etc.). In fig. 2.11 è riportata una tipica misura di questo tipo, che secondo Cremer [51] assomiglia ad un abete rovesciato. Come si nota sono presenti picchi sia positivi che negativi, e ciò è dovuto a due distinti fenomeni: innanzitutto i suoni impulsivi succitati sono tutti, più o meno, di tipo bipolare, cioè dopo una variazione di pressione positiva ne producono un' altra negativa, circa di pari ampiezza; inoltre i microfoni non sono mai perfettamente omnidirezionali, e tendono a dare una risposta elettrica negativa se colpiti dal di dietro da una onda di pressione positiva.

Indubbiamente nei Reflectogrammi sperimentali sono contenute tutte le informazioni riguardanti la trasmissione sonora fra la sorgente e il punto di ascolto,

ma queste informazioni sono rese poco evidenti dalla complessità del tracciato. Va notato inoltre che lo aspetto complessivo dei Reflectogrammi dipende drasticamente dalla distanza fra ascoltatore e sorgente, per cui è difficile poter comparare tracciati misurati in punti a distanza diversa.

Per rendere la visualizzazione più significativa si ricorre a vari metodi: il più semplice è quello di visualizzare il quadrato della pressione sonora, tramite un circuito elettrico di quadratura interposto fra il microfono e l'oscilloscopio. In questo modo si ottengono tracciati molto più chiari, privi ovviamente della parte negativa, e più facilmente interpretabili in termini energetici (l'energia sonora è proporzionale al quadrato della pressione sonora). In fig. 2.12 si può osservare un diagramma di questo tipo.

Una ulteriore modifica consiste nell'adottare una scala logaritmica delle ordinate, ovvero riportare i valori di pressione sonora in dB. In questo modo le riflessioni più deboli divengono apprezzabili, però risulta amplificato anche il rumore di fondo. Una rappresentazione di questo tipo è visibile in figura 2.13.

In generale, il Reflectogramma dipende dalla sorgente impulsiva utilizzata. È stato evidenziato [52] che, per garantire una sufficiente ripetibilità delle misure,

TEATRO COM. CASLIASI 17/2/87 P.1/01 09:41  
102kHz A:AC/ 50V B:AC/ 50V INST 0/10 DUAL 12

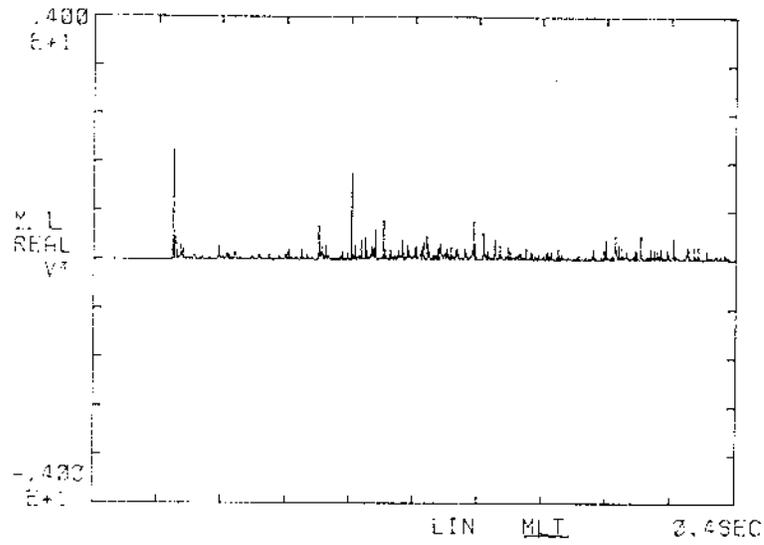


Fig. 2.12: Risposta all' impulso quadrata.

LAST 18:50:45  
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)  
NETW.: LIN P= 203 t= 6:496

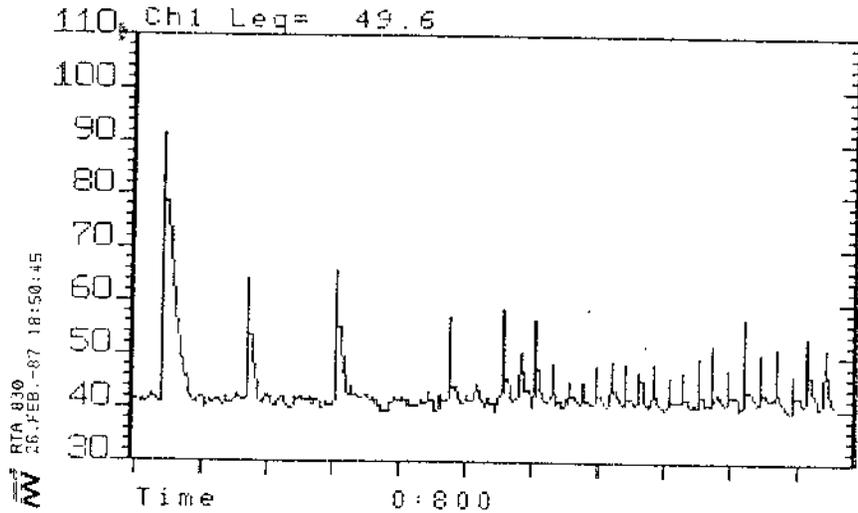


Fig. 2.13: Risposta all' impulso in decibel.

occorre utilizzare sorgenti in grado di fornire un sufficiente apporto energetico a tutte le frequenze interessate, e nello stesso tempo con impulsi di durata sufficientemente ridotta rispetto alla risoluzione temporale voluta. Le due condizioni sono in reciproco contrasto, poiché tanto più l' impulso è corto, tanto minore è la quantità di energia con esso emessa, specialmente alle basse frequenze, mentre l' ampiezza non può superare certi limiti, dettati da fenomeni di propagazione non lineare riscontrati con sorgenti impulsive troppo potenti.

Una soluzione correntemente accettata è quella di limitare l' ampiezza in frequenza dell' analisi tramite un sistema di filtraggio, ed utilizzare un impulso la cui durata sia di poco inferiore al reciproco della massima frequenza analizzata. Ciò comporta l' inconveniente di dover utilizzare sorgenti diverse per la misura nelle varie bande di frequenza, inconveniente risolvibile facilmente solo se la sorgente è un altoparlante pilotato da un apposito generatore di segnali. L' utilizzo di pistole è ancora possibile, se la frequenza massima non è molto elevata; alle frequenze più alte si possono utilizzare scintille elettriche.

Nella fig. 2.14 sono riportate le caratteristiche di emissione temporale delle più comuni sorgenti impulsive,

ottenute mediando un certo numero di eventi. Si nota ad esempio che le scintille sono adatte per i modelli in scala, che richiedono frequenze molto elevate, mentre i palloni vanno bene per studiare le basse frequenze.

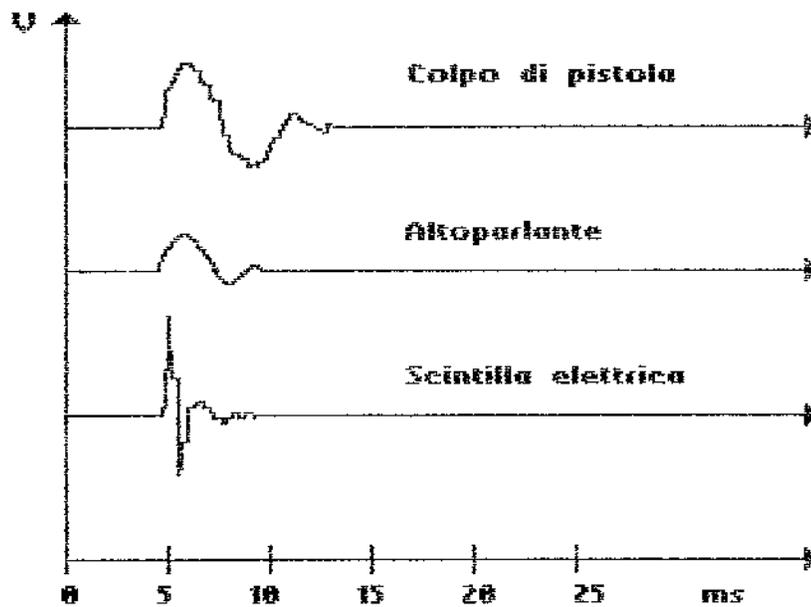
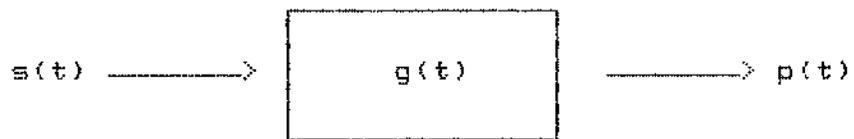


Fig. 2.14: Caratteristiche temporali delle sorgenti impulsive.

Sono stati proposti molti metodi per attenuare la influenza del tipo di sorgente sul risultato delle misure: all'origine di tutti sta la teoria dei sistemi di propagazione lineari, schematizzabile in questo modo:



ove  $s(t)$  è il segnale emesso dalla sorgente, il rettangolo rappresenta il sistema fisico, dotato di una Risposta all'Impulso  $g(t)$ ; all'uscita del sistema troviamo un segnale  $p(t)$ , che è il risultato delle modifiche prodotte dal sistema sul segnale in ingresso.

Per chiarezza, d'ora in avanti, verrà indicato  $p(t)$  con il termine "Reflectogramma", mentre verrà indicata  $g(t)$  come "Risposta all'Impulso".

Se il sistema è lineare, il risultato  $p(t)$  è la **convoluzione** del segnale in ingresso con la Risposta allo Impulso, cioè:

$$p(t) = s(t) * g(t) \quad ( 2.4 )$$

nella quale il simbolo " \* " indica appunto la convoluzione, operazione matematica consistente sostanzialmente in questo: per ottenere il valore della funzione  $p(t)$  all'istante  $t$ , si sommano gli infiniti prodotti del valore della funzione  $s(t)$ , valutato allo istante  $t'$ , per il valore della funzione  $g(t)$ , valutato all'istante  $t-t'$ , con  $t'$  variante fra 0 e infinito.

In termini matematici, ciò é esprimibile con il seguente integrale :

$$p(t) = \int_{t'=-\infty}^{t} s(t') \cdot g(t-t') \cdot dt' \quad ( 2.5 )$$

Effettuando la trasformata di Fourier delle tre funzioni reali nel dominio del tempo  $s(t)$ ,  $g(t)$  e  $p(t)$ , si ottengono tre funzioni complesse nel dominio della frequenza,  $S(f)$ ,  $G(f)$  e  $P(f)$ ; la trasformata di Fourier é una operazione matematica molto usata come filtro numerico di segnali, per generare il cosiddetto "spettro", ovvero la analisi in frequenza del segnale originario. Essa é definita matematicamente dalla relazione:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \exp(-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot dt \quad ( 2.6 )$$

La relazione 2.5 diviene dunque, nel dominio della frequenza:

$$P(f) = S(f) \cdot G(f) \quad ( 2.7 )$$

La convoluzione si riduce pertanto al semplice prodotto fra gli spettri complessi delle funzioni di partenza.

Da questa relazione si comprende come, misurando la funzione  $p(t)$  con le procedure prima viste, è possibile estrarre da essa la vera Risposta all' Impulso  $g(t)$ , indipendente dalla sorgente usata: è sufficiente effettuare la trasformata di Fourier del reflectogramma, dividere lo spettro complesso  $P(f)$  così ottenuto per lo spettro della sorgente impulsiva  $S(f)$ , precedentemente determinato in campo libero, e sottoporre poi lo spettro  $G(f)$  risultante dalla divisione ad una trasformata di

Fourier inversa, in modo da ottenere la voluta funzione  $g(t)$ .

Sono stati proposti vari metodi per effettuare questa trasformazione, indicata matematicamente come **deconvoluzione** [53], facenti riferimento a vari tipi di sorgente sonora.

Il procedimento è concettualmente applicabile a qualunque tipo di sorgente, anche non impulsiva, purché se ne conosca con esattezza la caratteristica temporale  $s(t)$  ovvero lo spettro  $S(f)$ ; ad esempio Berkhout, de Vries e Boone [54] propongono l' utilizzo di una sinusoide di ampiezza costante e frequenza crescente rapidamente (durata del segnale di 100 ms), mentre il Gruppo di Gottingen [55] propone l' utilizzo di un segnale pseudo-casuale generato da un calcolatore, con il vantaggio che l' algoritmo di deconvoluzione diviene estremamente semplice, essendo costituito solo da operazioni di somma e sottrazione.

Si giunge all' estremo limite di questo procedimento utilizzando una sorgente di rumore continuo, anziché un segnale di breve durata. Se infatti è disponibile un analizzatore di Fourier a due canali, è possibile misurare direttamente la Funzione di Trasferimento  $G(f)$  fra lo altoparlante ed il microfono di ascolto, effettuando il rapporto complesso fra lo spettro del segnale ricevuto dal

microfono e lo spettro del segnale emesso dallo altoparlante; la trasformata di Fourier inversa della Funzione di Trasferimento fornisce poi direttamente la desiderata Risposta all'Impulso  $g(t)$ .

Quest' ultimo metodo é stato utilizzato nella procedura sperimentale che verrà descritta nei capitoli successivi, per cui si ritiene utile scendere qui piú in dettaglio ed analizzare pregi e difetti del metodo stesso.

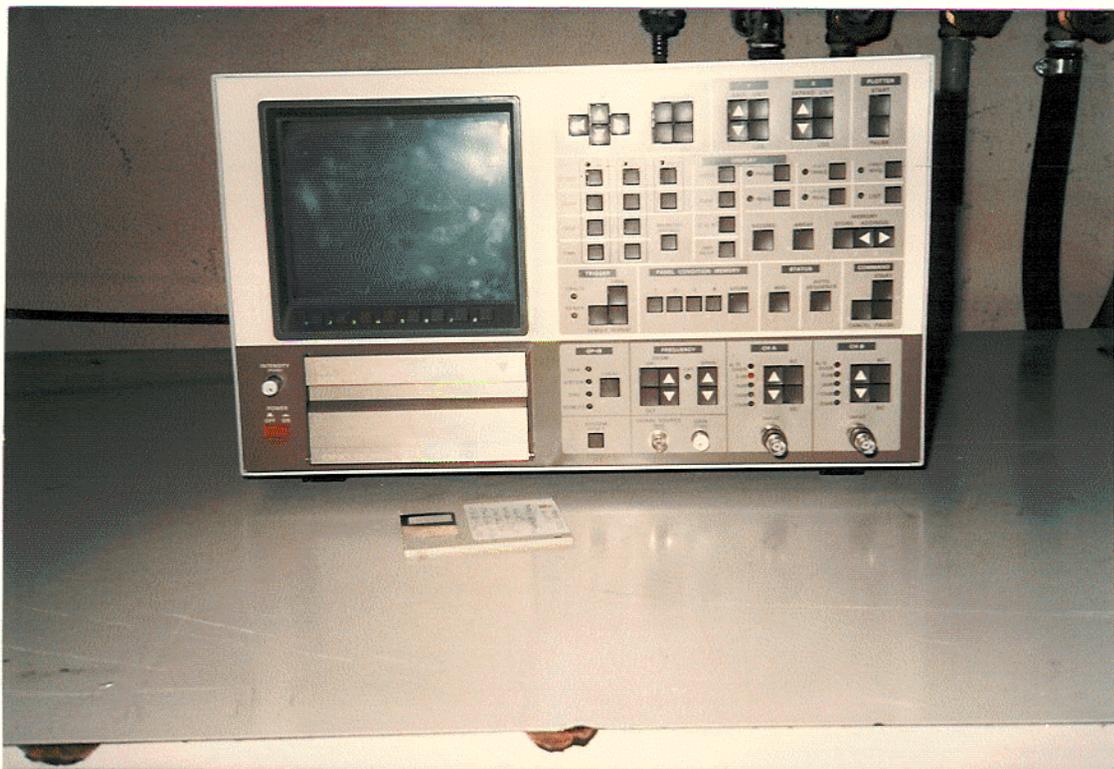


Fig. 2.15: Analizzatore di Fourier (FFT).

L'analizzatore di Fourier utilizzato (visibile in fig. 2.15) consente l'analisi a due canali su segmenti di segnale costituiti da 1024 punti campionati ciascuno; la frequenza di campionamento è 2.56 volte la massima frequenza ottenuta nell'analisi spettrale, onde evitare il fenomeno noto come "aliasing", dovuto ad un campionamento troppo lento, e dunque incapace di seguire la forma d'onda effettiva.

In base ai dati su esposti, limitando a 2 kHz la massima frequenza dell'analisi di Fourier, si ottiene che il segnale campionato su ciascun canale ha una lunghezza temporale di 200 ms, e tale sarà anche la lunghezza della risposta all'impulso ottenuta. Va poi tenuto conto che la analisi di Fourier inversa della Funzione di Trasferimento fornisce un segnale sviluppato sia nel tempo positivo che in quello negativo (un segnale cioè compreso fra -100 e +100 ms), e ciò riduce di fatto la lunghezza utile della funzione  $g(t)$ .

La prima onda diretta giunge poi sul microfono con un certo ritardo dall'istante in cui è stata emessa, e dunque essa corrisponde ad un picco posizionato in ritardo rispetto al centro della visualizzazione (0 ms). Ciò significa anche che l'analizzatore confronta due segnali in parte incorrelati, tanto meno correlati quanto maggiore è il ritardo temporale fra essi. Al limite, se il ritardo

superasse i 100 ms, non sarebbe possibile visualizzare la risposta all' impulso. Si può ovviare in parte a questo inconveniente utilizzando un apposito circuito di ritardo inserito nell' analizzatore, che consente di operare per passi pari ad  $1/2$  della lunghezza temporale campionata, e cioè 100 ms. In questo modo, quando il ritardo supera i 50 ms, si inserisce un primo passo di ritardo fittizio sul segnale proveniente dall' altoparlante, e si trasla così di 100 ms a sinistra la risposta all' impulso ottenuta. La durata effettiva del segnale utile, successivo all' onda diretta, varia dunque fra 50 e 150 ms, a seconda della distanza dalla sorgente. La misura è tanto migliore quanto più il ritardo dell' onda diretta è prossimo a 0 ms, poiché in queste condizioni i segnali analizzati sono massimamente correlati. Viceversa le condizioni divengono critiche quando il ritardo dell' onda diretta si approssima ai 50 ms di ritardo (o di anticipo, se si è operato il ritardo fittizio), e compare un rumore spurio a inquinare tutto il segnale, visibile chiaramente a sinistra della onda diretta, dove non dovrebbe esistere alcun segnale.

È possibile ridurre grandemente l' effetto di questo rumore fittizio operando una media su un discreto numero di successivi segnali: infatti la casualità del rumore fa sì che mediando esso tenda a ridursi notevolmente.

Un' altro aspetto da tenere presente è lo spettro di emissione della sorgente: siccome esso appare a denominatore nel calcolo della Funzione di Trasferimento, è importante che non vi siano zeri, cioè che lo altoparlante irradi sufficiente energia a tutte le frequenze. Ciò è difficile da realizzare soprattutto alle basse frequenze, ove solitamente la potenza emessa dallo altoparlante non riesce a sovrastare il rumore di fondo. Per ovviare a questo inconveniente si utilizza una sorgente di dimensioni rilevanti, alimentata con rumore rosa (più ricco di energia alle basse frequenze rispetto al rumore bianco). Una diversa soluzione sarebbe ottenibile con il filtraggio digitale della Funzione di Trasferimento, prima di effettuare la trasformata inversa, ponendo uguale a zero la prima parte di essa, corrispondente alle frequenze più basse.

Occorre infine tenere conto della Funzione di Trasferimento stessa dell' altoparlante, che in genere non è perfettamente piatta, e che pertanto influenza il risultato. Un modo per ovviare a questo ulteriore problema potrebbe essere quello di **equalizzare** la Funzione di Trasferimento ottenuta, dividendola per la Funzione di Trasferimento del solo altoparlante, misurata in precedenza in camera anecoica o in campo libero. Ciò però fornisce il risultato corretto solo se la equalizzazione

viene fatta utilizzando la Funzione di Trasferimento dello altoparlante misurata ad una distanza uguale a quella della misura effettiva nella sala, mantenendo poi invariata la potenza della sorgente.

Lo stesso risultato può essere ottenuto in modo molto elegante se si dispone di un microfono di riferimento posizionato in stretta prossimità dell' altoparlante stesso: il segnale generato da questo microfono di riferimento serve come segnale di ingresso allo analizzatore, assieme all' altro segnale proveniente dal microfono posizionato nel punto di misura. Se i due microfoni sono identici, si ha l' ulteriore vantaggio che la Risposta all' Impulso misurata non dipende né dallo spettro di emissione della sorgente, né dalla potenza sonora emessa, ferme restando le ipotesi di linearità della propagazione sonora comunemente verificate.

In fig. 2.16 sono visibili Risposte all' Impulso misurate secondo la procedura suddetta: si può notare un residuo rumore presente prima dell' arrivo dell' onda diretta, di ampiezza comunque tale da non distorcere significativamente il segnale successivo.

Il grande vantaggio della tecnica di misura adottata consiste nella accurata ripetibilità delle misure, che non trova riscontro nelle tecniche basate su un singolo evento impulsivo.

TEATRO ASTRA 25/02/87 - PUNTO 41 - ORECCHIO DESTRO  
100kHz A:AC/ 50V B:AC/ 52V INST 0/16 DUAL 1k

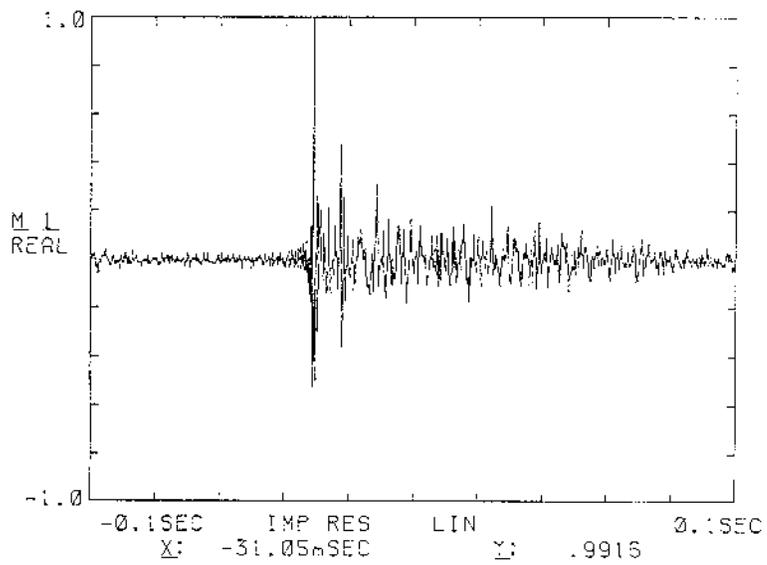
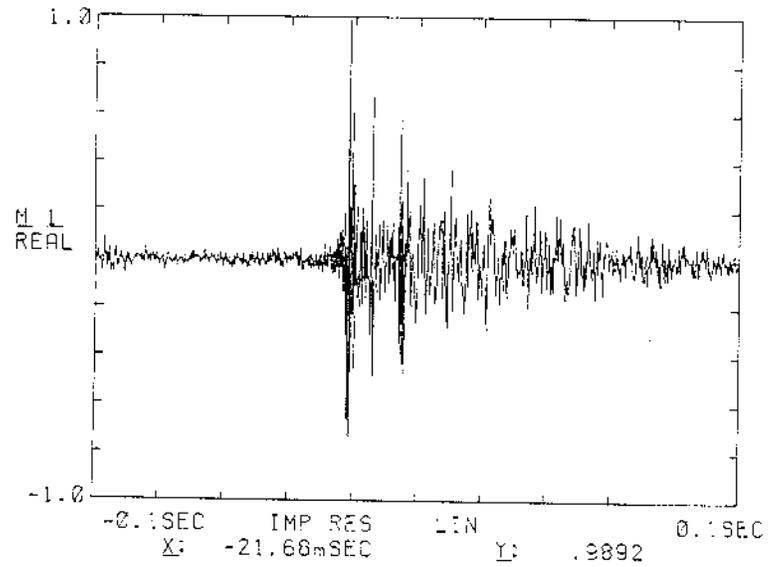


Fig. 2.16: Risposte all' impulso ottenute per deconvoluzione.

Lo svantaggio è rappresentato dalla limitata lunghezza temporale del segnale ottenuto, che consente sì lo studio delle prime riflessioni, ma non quello del successivo decadimento esponenziale, secondo la tecnica illustrata nel sottoparagrafo successivo.

Il segnale ottenuto viene memorizzato su un minidisco, da dove può venire in seguito richiamato per successive elaborazioni e confronti, possibili sia direttamente sullo analizzatore di Fourier che tramite un microcalcolatore ad esso interfacciato.

### 2.4.1 Risposta all' Impulso e Tempo di Riverberazione

Il legame fra la Risposta all' Impulso (che teoricamente contiene **tutte** le informazioni relative al campo acustico) ed il Tempo di Riverberazione è stato studiato ed esplicitato da Schroeder [50]: egli ha mostrato che il tradizionale decadimento riverberante, indicato con  $n^e(t)$ , prodotto dallo spegnimento di una sorgente di rumore stazionaria, è legato ad un integrale sulla Risposta all' Impulso.

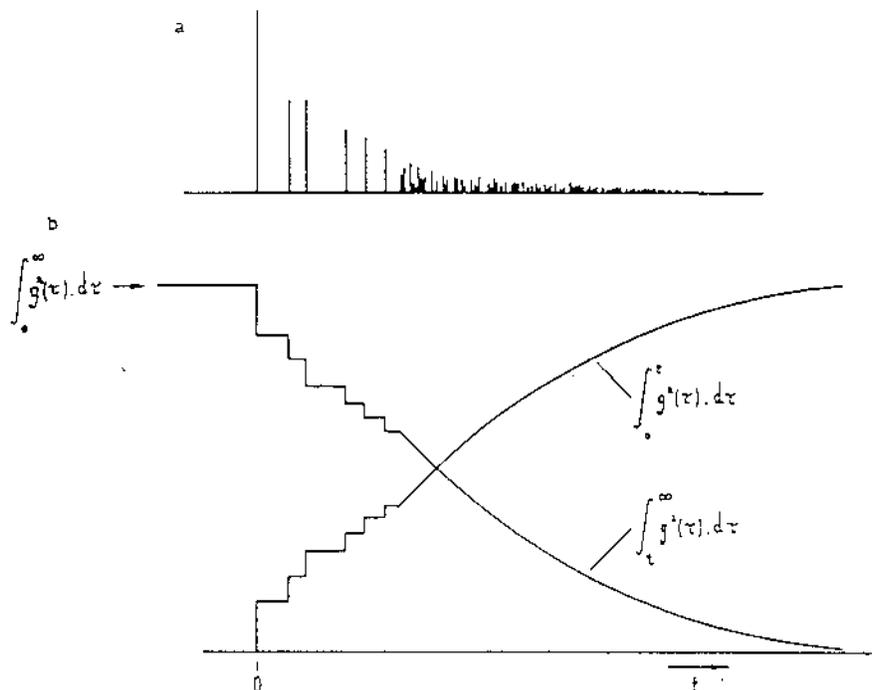
Il decadimento del rumore contiene fluttuazioni casuali dovute alla storia casuale del segnale immediatamente precedente allo spegnimento. Comunque, la media temporale di un numero infinito di decadimenti quadrati,  $\langle n^e(t) \rangle$ , è collegata alla Risposta all' Impulso al quadrato,  $g^e(t)$ , dalla seguente relazione:

$$\langle n^e(t) \rangle = \int_t^{\infty} g^e(t') \cdot dt' = \int_0^{\infty} g^e(t') \cdot dt' - \int_0^t g^e(t') \cdot dt' \quad (2.8)$$

La prima forma dell' integrale prevede un intervallo di

integrazione compreso fra  $t$  e infinito, il che implica misure con scala dei tempi invertita; la seconda forma consente invece di procedere in modo piú usuale, sottraendo dalla energia integrata totale, calcolata una sola volta, l' integrale fra 0 e  $t$  della Risposta allo Impulso al quadrato.

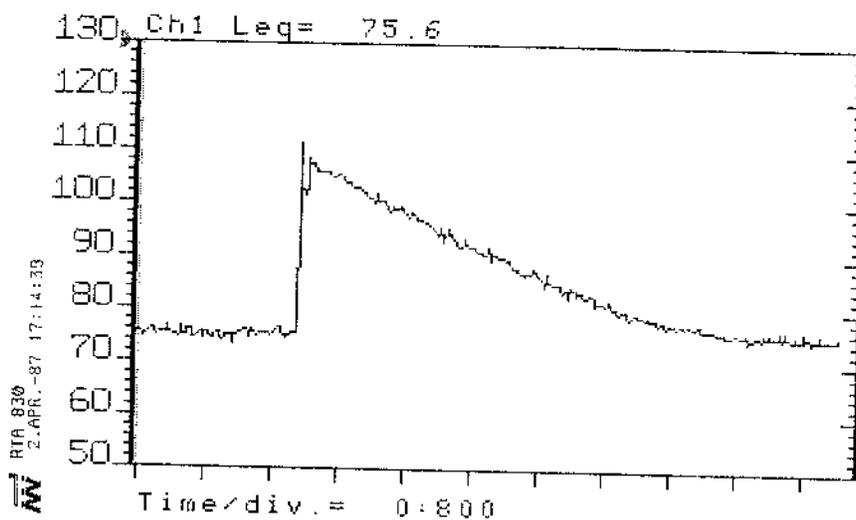
In fig. 2.17 é visibile la rappresentazione grafica della integrazione di Schroeder; trasformando questi grafici in scala logaritmica, é possibile calcolare il tempo di riverberazione con gli stessi procedimenti illustrati nel precedente paragrafo.



(a) Idealised squared impulse response. (b) Corresponding build-up curve (integral from 0 to  $t$ ) and decay curve (integral from  $t$  to  $\infty$ ).

Fig. 2.17: Ricostruzione della curva di decadimento mediante integrazione all' indietro.

LAST 17:14:39  
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)  
NETW.: LIN P=-60 t=-1:920



LAST 17:13:07  
Title: NUOVO-TEATRO-COMUNALE-(CA)  
NETW.: LIN P=-60 t=-1:920

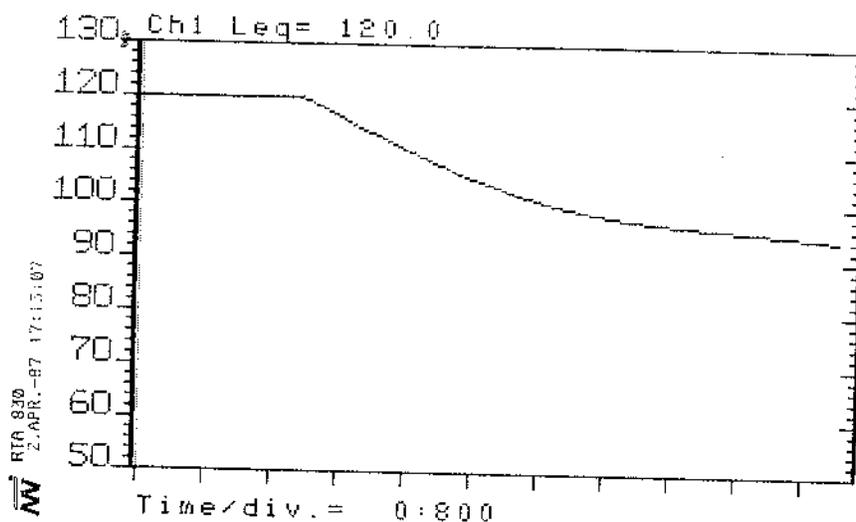


Fig. 2.18: Risposta all' impulso e corrispondente curva di decadimento ricostruita tramite la integrazione di Schroeder.

L' integrazione di Schroeder é molto utile per il calcolo dei Tempi di Prima Riverberazione, poiché fornisce con molto dettaglio i primi millisecondi della curva di decadimento. Essa dá risultati meno buoni nel calcolo del Tempo di Riverberazione Classico, poiché in questo caso é necessario disporre di una Risposta all' Impulso lunga almeno la metà del Tempo di Riverberazione stesso.

Attualmente sono disponibili strumenti, quale quello illustrato in fig. 2.8, capaci di effettuare automaticamente l' integrazione di Schroeder di segnali impulsivi; in questo modo é possibile ottenere accurate misure dei tempi di riverberazione alle varie frequenze con un semplice colpo di pistola, misure usualmente abbastanza confrontabili con le misure classiche, ottenute dallo spegnimento di un sorgente stazionaria; in caso di decadimento non esponenziale si riscontrano viceversa discrepanze fra i due metodi di misura del tempo di riverberazione, ma secondo Schroeder é proprio il valore misurato dalla risposta all' impulso integrata ad essere meglio correlato con la sensazione soggettiva.

In fig. 2.18 sono visibili una risposta all' impulso quadrata in scala logaritmica e la corrispondente curva di decadimento ottenuta dall' integrazione di Schroeder: nella seconda si nota un tipico fenomeno di decadimento non esponenziale, che non era così evidente nel segnale

impulsivo; si nota anche che la integrazione ha ridotto il campo dinamico della misura, ma ha smussato le asperità del tracciato di decadimento.

## 2.5 Misure di Distribuzione Spaziale

Nel capitolo precedente è stata evidenziata la importanza crescente attribuita nel tempo alla sensazione di spazialità del campo sonoro, definita di volta in volta con termini soggettivi diversi quali "Impressione Spaziale" o "Avvolgimento" (envelopment). Concettualmente però questi termini non indicano la causa fisica della gradevole sensazione di trovarsi **dentro** la musica anziché ascoltarla da lontano, causa in parte non del tutto chiarita nemmeno dalle teorie più moderne.

La capacità dell' uomo di percepire la direzione di provenienza dei suoni dipende da una serie di complessi fattori: in ordine di importanza, il primo è certamente il tempo di ritardo fra la percezione dei suoni nelle due orecchie, responsabile della individuazione dell' angolo formato dalla direzione di arrivo del suono con la congiungente i centri dei timpani.

La evidenza di questo fenomeno si ha dalla constatazione che sott' acqua non si percepisce la direzione di provenienza dei suoni, anche se i suoni stessi sono perfettamente uditi. Osservando che la velocità del suono nell' acqua è circa 5 volte maggiore che in aria, si deduce che il tempo impiegato dal suono a

viaggiare da una orecchia all'altra viene ridotto di un fattore 5 rispetto all'analogo fenomeno in aria; in queste condizioni, il centro nervoso dell'udito non è più in grado di riconoscere tempi di ritardo così ridotti, ed interpreta la sensazione binaurale come quella di un suono proveniente frontalmente, qualunque sia la reale direzione di provenienza.

Un secondo fenomeno, utile per la localizzazione delle sorgenti sonore, è costituito dalla diffrazione di certe frequenze attorno alla testa ed ai padiglioni auricolari. Ciò fa sì che a queste frequenze l'orecchio diventi leggermente direttivo, e ciò, unitamente a una serie di piccoli movimenti involontari della testa, consente di localizzare la direzione dalla quale proviene il segnale. Anche questa sensazione addizionale scompare sott'acqua, poiché anche le lunghezze d'onda crescono di un fattore 5, e pertanto le diffrazioni avvengono a frequenze diverse da quelle cui l'orecchio è abituato.

Contribuiscono infine a fornire la localizzazione anche gli altri sensi, in particolare la vista: guardando la televisione nessuno localizza la provenienza dei suoni nell'altoparlante dell'apparecchio, ma nelle appropriate immagini visualizzate sullo schermo.

La caratterizzazione della sensazione spaziale in un punto di una sala da concerto sarebbe dunque teoricamente

possibile individuando per ciascuna riflessione, oltre che per l'onda diretta, la direzione di provenienza, tramite ad esempio una coppia di angoli: ciò è fattibile nel caso di calcolo teorico con la tecnica delle sorgenti virtuali, ma risulta del tutto problematico dal punto di vista pratico. In questo modo si ottengono peraltro informazioni fortemente ridondanti rispetto alla sensazione studiata; infatti campi acustici strutturalmente anche molto differenti per numero e provenienza delle riflessioni possono fornire una sensazione spaziale equipollente.

Sono stati proposti pertanto numerosi parametri oggettivi per descrivere la sensazione spaziale, tutti basati sul fatto che vengono usualmente giudicati "avvolgenti", e perciò graditi, i campi acustici dotati di numerose e forti prime riflessioni laterali, mentre vengono giudicati "distaccati" e "lontani" i campi acustici caratterizzati da riflessioni deboli, o forti ma provenienti dell'alto.

Due di questi parametri si sono rivelati fisicamente rilevanti e soggettivamente molto ben correlati: sono la Efficienza Laterale (LE) di Jordan [30] e la Coerenza Mutua Inter-Aurale (IACC) del gruppo di Gottingen [27].

La prima costituisce un parametro di misurazione molto semplice, poiché è definita da un rapporto fra due energie integrate, misurate la prima tramite un microfono "a

figura di 8" (così chiamato dalla forma della sua curva di sensibilità direzionale), e la seconda tramite un comune microfono omnidirezionale:

$$LE = \frac{\int_{25 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} p_e^E(t) \cdot dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p_o^E(t) \cdot dt} \quad (2.9)$$

In cui  $p_o$  è la pressione sonora misurata dal microfono omnidirezionale, mentre  $p_e$  è la pressione sonora misurata dal microfono "a figura di 8": questo è un microfono a caratteristica dipolare (microfono sensibile al gradiente della pressione del primo ordine), orientato con una direzione di sensibilità nulla verso la sorgente sonora, essendo la direzione di massima sensibilità allineata con la congiungente i centri dei due timpani.

La misurazione è molto semplice, poiché la strumentazione non richiede elevata sofisticazione, e la elaborazione dei segnali è possibile senza ricorrere a costosi analizzatori digitali.

L' Efficienza Laterale è stata oggetto di numerosi studi, che ne hanno confermato la significatività come

parametro sperimentale in grado di descrivere adeguatamente la sensazione spaziale. Tuttavia è difficile prevedere teoricamente il valore della LE tramite le tecniche usuali, divenendo in tal caso la mole di lavoro equivalente a quello necessario per calcolare il secondo parametro, cioè la Coerenza Mutua Inter-Aurale

Quest' ultima è definita come il valore massimo assunto nell' intervallo  $(-1..+1)$  ms dalla funzione di Correlazione Mutua dei primi 50 ms delle risposte allo impulso misurate tramite due microfoni collocati al posto dei timpani di una testa artificiale, orientata in direzione della sorgente sonora.

La procedura di misura consiste dunque anzitutto nella determinazione delle due risposte all' impulso (sinistra e destra), indicate con  $g_1(t)$  e  $g_2(t)$  (left e right), tramite uno dei metodi illustrati nel paragrafo precedente.

Dalle risposte all' impulso viene estratto uno spezzone, lungo usualmente 50 ms a partire dall' arrivo dell' onda diretta (anche se alcuni autori propongono di estendere questo intervallo ad 80 ms [56]). Dei due segnali così ottenuti viene calcolata la funzione normalizzata di Correlazione Mutua  $K(t')$ , così definita matematicamente per tempi sia positivi che negativi:

$$K(t') = \frac{\int_{-T}^{+T} p_1(t) \cdot p_r(t+t') \cdot dt}{\left[ \int_{-T}^{+T} p_1^2(t) \cdot dt \cdot \int_{-T}^{+T} p_r^2(t) \cdot dt \right]^{1/2}} \quad ( E.10 )$$

Essa rappresenta il grado di somiglianza dei segnali ricevuti dalle due orecchie, sfasati del ritardo  $t'$ . Usualmente essa presenta il valore massimo per un ritardo di 0 ms, se la testa è orientata direttamente verso la sorgente. Qualora invece la maggior energia sonora provenisse lateralmente, il valore massimo si verifica per un valore di  $t'$  diverso da zero, ma comunque mai superiore a  $+ 0 - 1$  ms, poiché questo è il massimo tempo impiegato da un suono perfettamente laterale ad aggirare la testa e a colpire l' orecchio opposto.

Questo valore massimo viene considerato come parametro significativo della somiglianza degli eventi sonori sulle due orecchie, e pertanto è tanto più basso quanto più i suoni sono dissimili (segno di forti riflessioni laterali); il valore numerico della IACC deve dunque essere il più basso possibile per garantire la migliore sensazione spaziale, al contrario della Efficienza Laterale LE.

Ando [45] propone di utilizzare non le risposte allo

impulso misurate dalle orecchie, ma direttamente i segnali di pressione sonora prodotti dalla esecuzione di un brano musicale, estendendo il tempo di integrazione T a 17 s. I risultati ottenuti con questa procedura dipendono leggermente dalla sorgente sonora e dal brano musicale, ma in pratica restano molto vicini a quelli misurati a partire dalle risposte all' impulso.

In ogni modo è stato riscontrato uno stretto legame fra i valori dei parametri IACC e LE, e si può ritenere che ai fini pratici la scelta dell' uno o dell' altro metodo possa essere decisa in base alla strumentazione ed ai dati disponibili. Utilizzando un filtraggio in frequenza nella determinazione di LE (ad es. da 350 a 1400 Hz, secondo Jordan [57]), si semplifica ulteriormente la misurazione, poiché è più facile ottenere buoni rapporti segnale/disturbo, senza ridurre la significatività del parametro misurato.

Analogamente è possibile filtrare i segnali provenienti dalla testa artificiale, ed in questo caso solitamente si utilizza un filtro di pesatura A, corrispondente alla sensibilità media dell' orecchio umano; secondo Ando questo modo di procedere porta a simulare strettamente i processi di localizzazione sonora che avvengono effettivamente nel Sistema Nervoso Centrale dell' uomo.

Sulla base delle possibilità suesposte, è stata scelta la Coerenza Mutua Inter-Aurale quale parametro sperimentale da utilizzare nella procedura di valutazione della qualità acustica descritta nei capitoli successivi: in particolare è stata seguita la definizione originale data da Schroeder, cioè sono stati utilizzati i primi 50 ms delle risposte all' impulso non filtrate.

Il calcolo della funzione normalizzata di correlazione mutua viene svolto dallo stesso analizzatore di Fourier utilizzato per l' elaborazione delle Risposte allo Impulso: infatti un microcalcolatore provvede ad estrarre da esse i segmenti temporali utili, e a rinviarli sotto forma di segnale nel tempo all' analizzatore che ne valuta la correlazione mutua. Viene infine individuato il valore massimo della funzione nell' intervallo citato, pari al valore della IACC del punto di misura.

## 2.6 Misure di intensità acustica

Si consideri un campo acustico, ed in un particolare punto di esso si indichi con  $p'(t)$  il valore istantaneo della fluttuazione di pressione sonora, mentre si indichi con  $\mathbf{u}(t)$  il vettore velocità istantanea delle particelle di fluido. Si consideri poi nel punto scelto un elemento di superficie  $dS$ , la cui giacitura sia individuata dal versore  $\mathbf{n}$ . Il vettore forza, agente su una faccia dello elemento di superficie, dovuto alla pressione  $p'(t)$ , vale  $p'(t) dS \mathbf{n}$ . Il lavoro fatto nell'unità di tempo da questa forza sulle particelle in movimento con velocità  $\mathbf{u}(t)$  vale pertanto  $p'(t) dS \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}(t)$ ; dividendo per l'area  $dS$ , si ottiene l'energia che attraversa nell'unità di tempo l'unità di superficie di giacitura assegnata:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = p'(t) \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}(t) \quad ( 2.11 )$$

Si definisce pertanto un vettore Intensità Acustica Istantanea  $\mathbf{I}(t)$ , tale che la sua proiezione nella direzione normale ad una superficie fornisca la potenza

incidente sulla unità di superficie stessa, tramite la posizione:

$$I(t) = p(t) u(t) \quad ( 2.12 )$$

Dell' Intensità Acustica Istantanea così definita viene poi usualmente calcolato il valore medio nel tempo, cui si dá semplicemente il nome di Intensità Acustica I.

Questa grandezza si é rivelata molto utile per lo studio dei fenomeni di propagazione sonora, poiché calcolando (o misurando) la Intensità Acustica in numerosi punti del campo sonoro, é possibile visualizzare le linee di flusso della propagazione. E' altresí possibile, da misure di Intensità Acustica, ottenere direttamente la potenza sonora emessa da una sorgente in un ambiente qualsiasi, senza necessariamente disporre di una camera anecoica; si può ricavare in tal modo l' efficienza di emissione delle varie parti della sorgente, operando poi per aumentarla (ad es. se si tratta di un altoparlante) o per ridurla (se si tratta di una macchina rumorosa). E' infine possibile misurare l' impedenza acustica effettiva di una parete, e quindi anche il coeff. di assorbimento,

semplicemente misurando l' Intensità Acustica in prossimità della stessa.

La misura della Intensità Acustica é resa possibile direttamente in base alla sua definizione; é infatti sufficiente disporre di un trasduttore in grado di rilevare la pressione sonora istantanea (cioé un semplice microfono) e di un altro in grado di rilevare la velocità istantanea delle particelle del mezzo. Questo secondo trasduttore non può essere costituito da uno degli usuali anemometri, poiché essi non sono in grado di misurare fluttuazioni molto rapide di velocità: l' unica realizzazione commerciale sinora prodotta sfrutta il rilevamento dell' effetto Doppler prodotto dal movimento dell'aria su una onda ultrasonica prodotta appositamente.

Un altro metodo molto diffuso di misurazione della intensità acustica (o meglio della componente del vettore Intensità Acustica in una data direzione), sfrutta la conservazione della quantità di moto in un fluido in quiete, espressa dalla relazione:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = - \rho_0 \frac{\partial u_n}{\partial t} \quad ( 2.13 )$$

dove  $n$  indica la direzione scelta. Integrando nel dominio del tempo si ottiene:

$$u_n = - \frac{1}{\rho_0} \int \frac{\partial p}{\partial n} dt \quad ( 2.14 )$$

In pratica la derivata della pressione nella direzione prefissata viene ottenuta con un rapporto incrementale, misurando la pressione sonora tramite due microfoni identici, spaziati di una distanza  $r$ ; la pressione sonora viene poi posta uguale al valor medio delle pressioni sonore misurate dai due microfoni; si ha dunque:

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad u_n = - \frac{1}{r \rho_0} \int_{-t}^t (p_2 - p_1) dt' \quad ( 2.14 )$$

Il valore istantaneo della Intensità Acustica può dunque essere ottenuto come prodotto delle due quantità suindicate:

$$I_n(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2 \rho_0 r} \int_{-\infty}^t [p_1(t') - p_2(t')] dt' \quad (2.15)$$

In base a questo principio funzionano numerosi strumenti per la misura della Intensità Acustica; ad esempio lo analizzatore in terzi d'ottava di fig. 1.8 può funzionare come misuratore di intensità sia mediante una coppia di microfoni, sia con un sensore di velocità ad ultrasuoni.

Anche un analizzatore di Fourier bicanale può essere utilizzato per la misura della intensità acustica (nelle ipotesi in cui è lecito utilizzare la trasformata di Fourier), poiché la trasformazione nel dominio della frequenza della relazione 2.15 fornisce:

$$I_n(f) = - \frac{\text{Im} [G_{12}(f)]}{\rho_0 2\pi f r} \quad (2.16)$$

Nella quale  $G_{12}$  indica la densità spettrale incrociata dei due segnali di pressione, pari al prodotto complesso degli

spettri di Fourier dei due segnali. La intensità  $I(f)$  deve essere intesa come valore medio nel tempo, e non più come valore istantaneo, essendo la durata temporale della media pari alla lunghezza nel tempo dei segmenti di segnale analizzati.

Tramite le misure di intensità acustica si acquisisce una notevole comprensione dei fenomeni di propagazione dell'energia sonora, utilizzata fino ad oggi soprattutto per la riduzione della propagazione del rumore [58] e per la riproduzione di campi sonori in scala reale e ridotta [59], mentre sono ancora in corso studi sulla capacità dell'apparato uditivo umano di percepire la direzione di provenienza delle riflessioni in un ambiente chiuso.