

Acoustic design

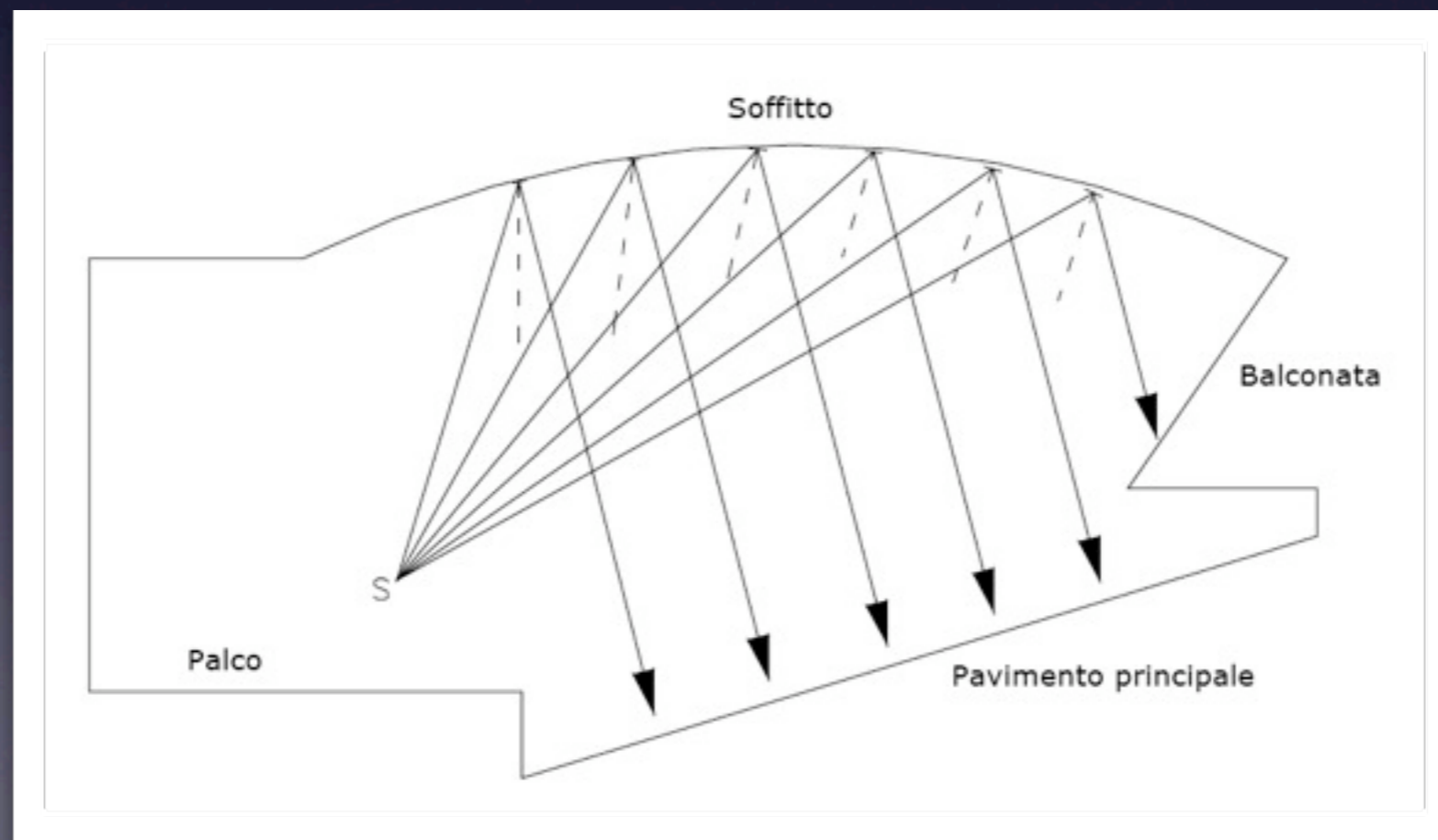
iSound 11/03/2010

Introduzione all'acustica degli ambienti chiusi

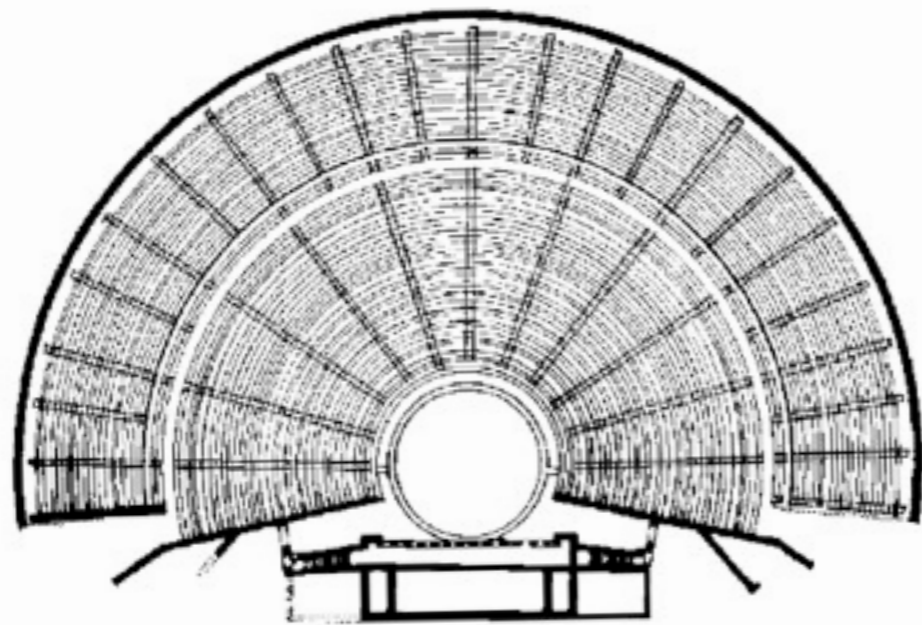
Dott. Donato Masci
info@acousticdesign.it

Room Acoustics: Acustica negli ambienti chiusi

Scienza che studia la propagazione del suono in locali chiusi o comunque in presenza di oggetti capaci di causare effetti significativi di assorbimento e riflessione.



nell'antichità



teatro di Epidauro, grecia



Il Fenomeno Sonoro



Sorgente

1



Mezzo
(zona di trasmissione)

2



Ascoltatore

3

Il Mezzo elastico

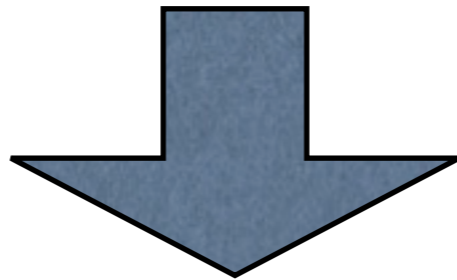
Il suono richiede un mezzo elastico in cui propagarsi.

Il suono nell'aria: le particelle di materia coinvolta nel trasporto del suono fluttuano attorno ad una posizione di equilibrio e il loro moto è parallelo alla direzione dell'onda:
onde longitudinali.

In altri mezzi il suono si può propagare sotto forma di onde di tipo trasversale.

Fenomeni di Riflessione, Assorbimento e Trasmissione

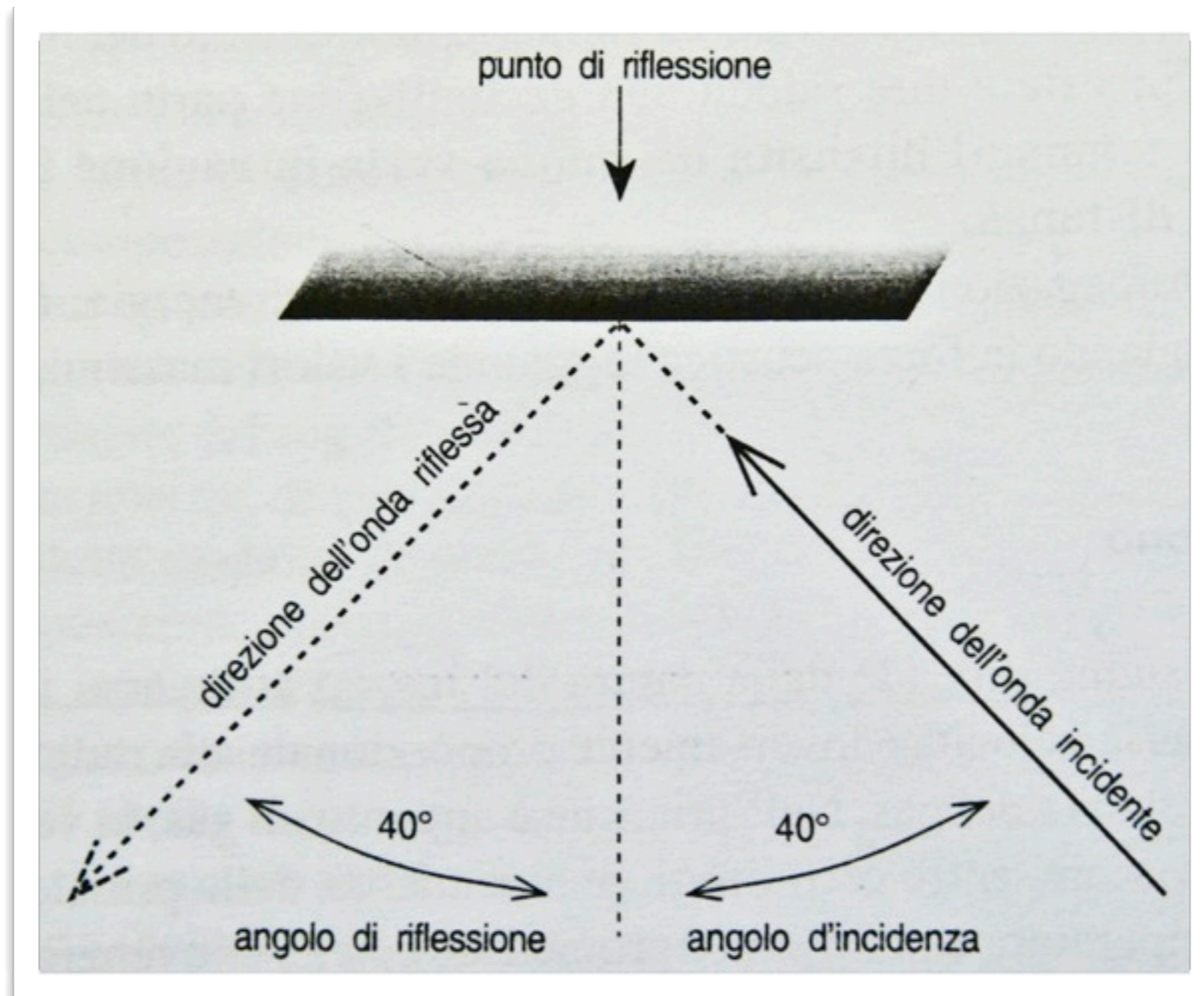
Il suono è un fenomeno di tipo ondulatorio



è soggetto ai tipici comportamenti ondulatori:

Riflessione
Rifrazione
Diffrazione
Interferenza

Quando un sistema di onde sonore incontra un corpo incapace di vibrare le onde riflettono con una norma che è comune a tutti i fenomeni del genere e secondo la quale l'angolo d'incidenza è uguale a quello di riflessione:



Dalle caratteristiche della superficie riflettente, dipende l'intensità e la qualità della riflessione. In ogni caso, la parte di energia che non viene riflessa è assorbita oppure rifratta.

In un ambiente chiuso la porzione di energia riflessa dalle superfici di confine dipende dal loro comportamento acustico, in generale descritto dai coefficienti di riflessione, assorbimento e trasmissione:

Bilancio Energetico: $W_0 = W_r + W_a + W_t$

Coefficienti: $1 = r + \delta + \tau$

**Coefficiente di assorbimento
acustico apparente:** $\alpha = 1 - r$

**assorbimento acustico
di una superficie:** $A = S \cdot \alpha$

assorbimento totale: $A = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots + S_n\alpha_n = \Sigma S_i\alpha_i$

Grandezze fisiche acustiche

Pressione acustica

Pressione efficace:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

Densità di energia:

$$D = \frac{p_{eff}^2}{\rho \cdot c^2}$$

ρ = densità del mezzo
 c = velocità del suono

Livelli sonori:

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \frac{p_{eff}}{p_{rif}}$$

$$p_{rif} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$$

$$L_w = 10 \log \frac{w}{w_{rif}}$$

$$w_{rif} = 10^{-12} \text{ W}$$

Relazioni tra livelli sonori

Ambiente esterno

Sorgente Generica $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 10 \log S$

Sorgente Sferica $L_p \cong L_W - 10 \log \frac{400}{\rho c} - 20 \log r - 11$

(con approssimazione di campo lontano, ossia:)

$$r > \frac{10}{2\pi} \lambda \approx 1.6 \lambda$$

Relazioni tra livelli sonori

Ambiente chiuso

Campo riverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \frac{4}{A}$$

Campo semiriverberante

$$L_p \cong L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

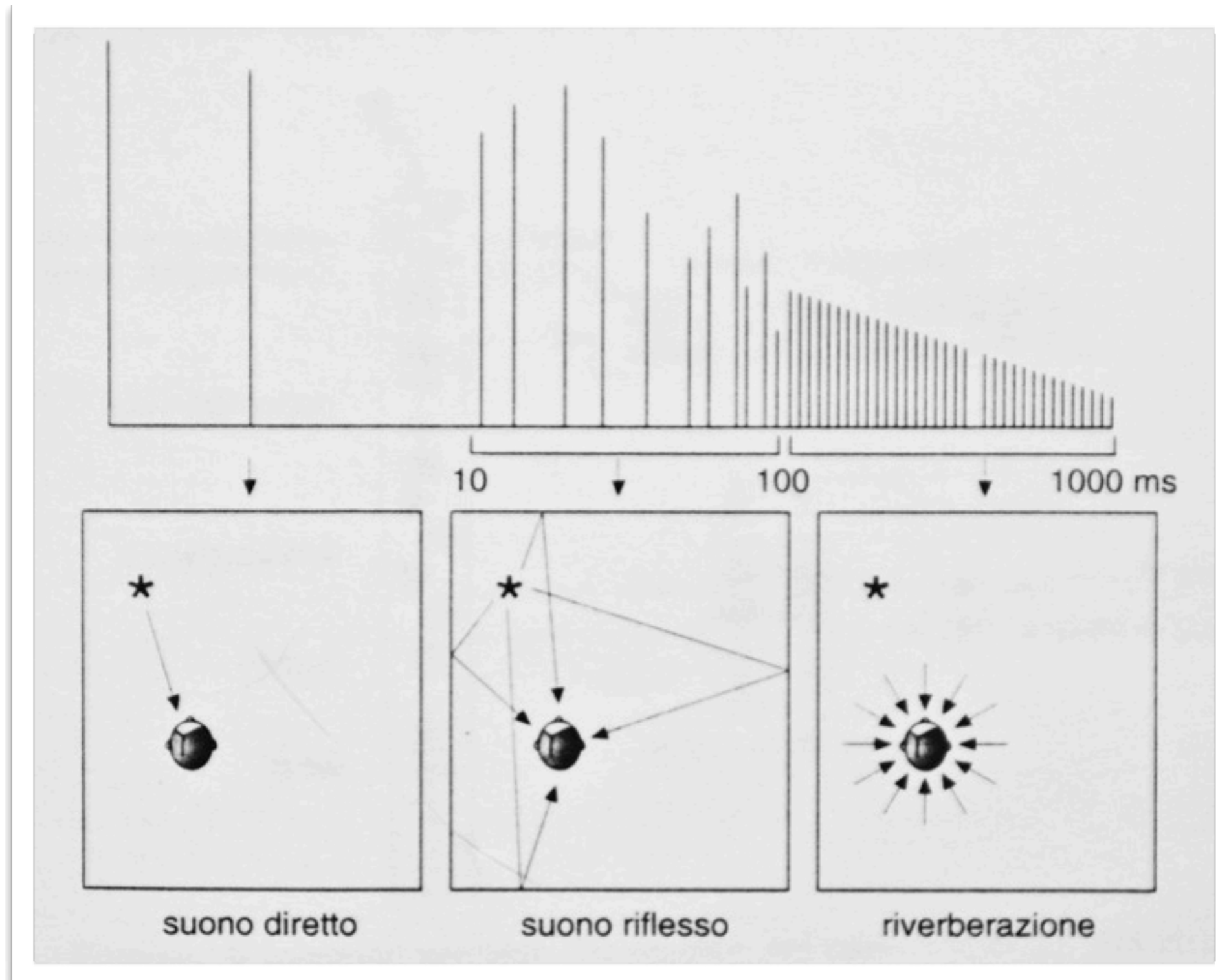
dove

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{1}{\alpha - \delta} = \frac{\bar{\alpha} \cdot S}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{S \cdot A}{S - A}$$

e

Q è il fattore direttività della sorgente
per sorgenti omnidirezionali è 1

Suono in un ambiente chiuso



Suono diretto: determina la nostra percezione della posizione e della dimensione della sorgente sonora e trasmette il vero timbro della sorgente. L'ammontare di assorbimento che si verifica quando il suono viene riflesso da una superficie non è uguale a tutte le frequenze; perciò il timbro del suono riflesso è influenzato dalle caratteristiche della superficie che ha incontrato.

Prime riflessioni: raggiungono l'orecchio entro 50 millisecondi dal suono diretto; queste riflessioni sono il risultato di onde che hanno incontrato poche superfici prima di arrivare all'ascoltatore, e possono giungere da direzioni diverse rispetto al suono diretto.

L'intervallo di tempo che intercorre fra l'ascolto del suono diretto e l'inizio delle prime riflessioni fornisce informazioni sulla dimensione della stanza in cui si verifica l'evento sonoro.

Più lontane sono le superfici rispetto all'ascoltatore, maggiore sarà il tempo che il suono impiega per raggiungerle e per venire poi riflesso verso l'ascoltatore stesso.

Prime Riflessioni: Fusione Temporale

Le prime riflessioni che giungono all'orecchio umano entro 30 millisecondi dal suono diretto, oltre a non risultare udibili, sono effettivamente fuse con il suono diretto stesso.

L'orecchio umano non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo e considera le riflessioni come parte del suono diretto.

Il limite di tempo di 30 ms per la fusione temporale non è assoluto: dipende piuttosto dall'involuppo del suono. La fusione si interrompe a 4 ms nel caso di transienti, anche se può arrivare fino a 80 ms nel caso di suoni che cambiano lentamente, come ad esempio il legato dei violini.

Nonostante le prime riflessioni siano sopprese e risultino amalgamate con il suono diretto, esse modificano la nostra percezione del suono, rendendolo più pieno e più intenso.

...dopo le prime riflessioni

I suoni che raggiungono l'ascoltatore in un istante successivo a 50 ms dopo il suono diretto, sono stati riflessi da un numero tale di superfici diverse che cominciano a raggiungere l'ascoltatore in un flusso virtualmente continuo e da tutte le direzioni.

Queste onde ravvicinate sono dette riverberazione: la riverberazione è caratterizzata da una diminuzione graduale di ampiezza e dal fatto che conferisce calore e corposità al suono; inoltre contribuisce anche alla sua intensità.

A causa delle molte riflessioni, il timbro della riverberazione è molto diverso rispetto al suono diretto, e la differenza principale è un taglio delle alte frequenze e una conseguente enfaticizzazione delle basse.

Riverberazione

persistenza del suono dopo che la sorgente sonora ha cessato di vibrare

causata dalla riflessione continuata delle onde sonore sulle superfici dell'ambiente in cui si propagano

in ogni riflessione l'intensità del suono viene ridotta di un fattore $x < 1$, dopo N riflessioni risulterà ridotta di un fattore x^N :

$$I = I_0 x^{t/\Delta T} = I_0 e^{-t/\tau}$$

andamento esponenziale decrescente

Wallace Clement Sabine

1868 - 1919

Professore all'Università di Harvard
fu il primo fisico a studiare l'acustica
ambientale.

Legge di Sabine



Tempo di Riverberazione RT60

tempo necessario affinché la densità di energia sonora decresca di 60 dB dal valore originario dopo che la sorgente abbia cessato di vibrare

Legge di Sabine:

$$RT60 [s] = 0.161 \frac{V [m^3]}{A [m^2]}$$

Legge di Sabine

la formula di Sabine presuppone
alcune condizioni:

- densità di energia costante da punto a punto
- assorbimento acustico da parte dell'aria nullo
- il suono si attenua in modo esponenziale

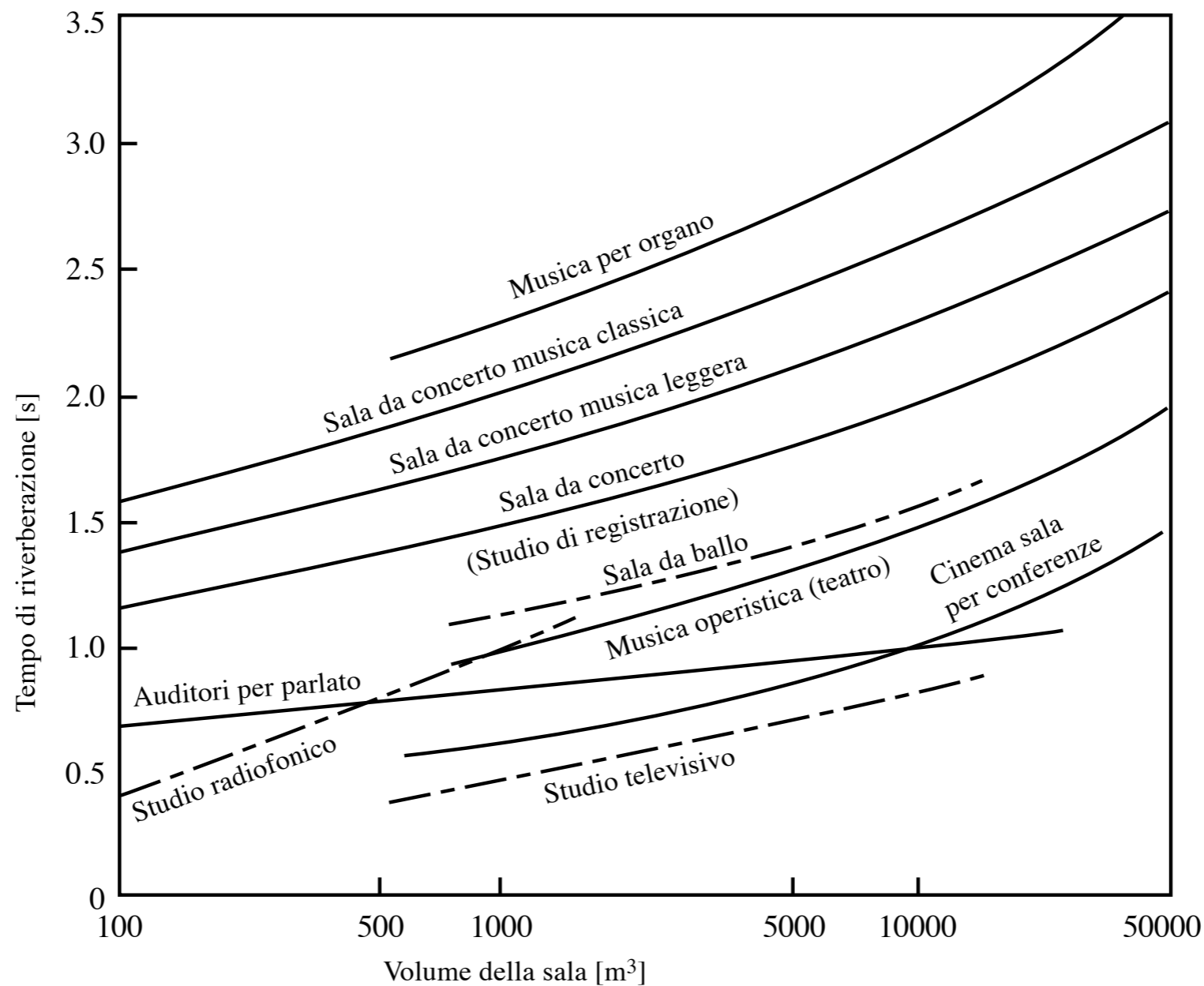
Tempo di riverberazione ottimale

per la migliore intelligibilità si deve avere nel punto di ascolto un'intensità sonora sufficiente ed una dispersione temporale non eccessiva del suono emesso dalla sorgente

RIVERBERAZIONE: ruolo duplice

innalza l'intensità sonora rispetto a quella del suono diretto
aumenta la dispersione temporale, incidendo negativamente sulla
comprensione delle note e dei fonemi

il tempo di riverberazione deve assumere un valore
ottimale in modo da offrire il miglior compromesso
possibile



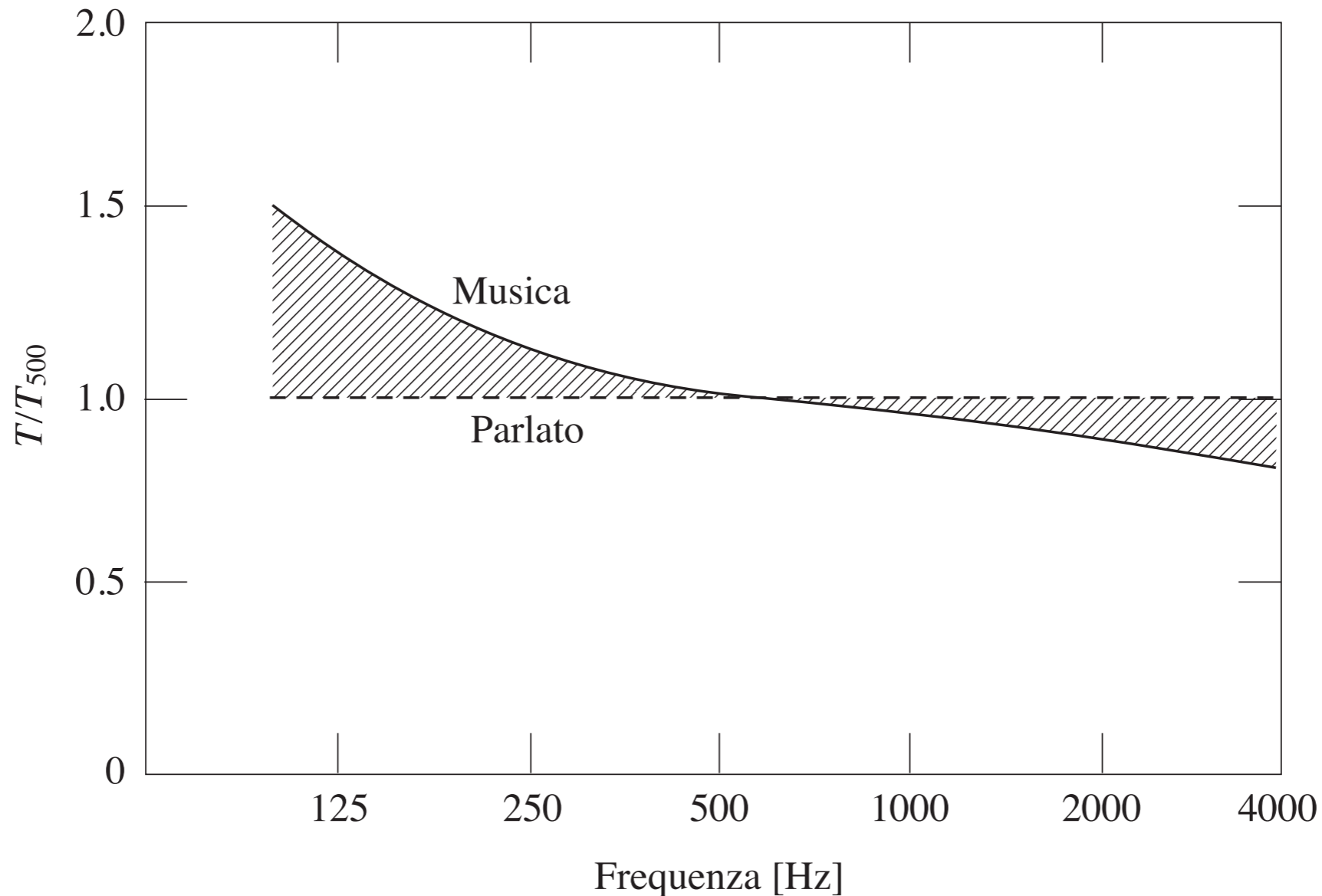
il valore ottimale cresce all'aumentare del volume della sala per una determinata destinazione d'uso:

formule empiriche
(V in m^3)

$$RT60_{parlato} = 0.1 V^{1/3}$$

$$RT60_{musica} = 0.5 + 10^{-4} V$$

andamento del tempo di riverberazione ottimale in funzione della frequenza:



il tempo di riverberazione ottimale alle frequenze più basse può quasi raddoppiare rispetto al valore corrispondente a 500 Hz

Valori di RT60 relativi a importanti sale acusticamente efficienti

Sala	$V/10^3$ [m ³]	$S/10^3$ [m ²]	Tempo di riverber. [s] a varie frequenze [Hz]						Prima riflessione [ms]	Posti

			125	250	500	1000	2000	4000		
Gerusalemme, Binyanei Ha'oomah	24.7	2.4	2.2	2.0	1.75	1.75	1.65	1.5	13-26	3100
New York, Carnegie Hall (pre-rest.)	24.3	2.0	1.8	1.8	1.8	1.6	1.6	1.4	16-23	2800
Boston, Symphony Hall	18.7	1.6	2.2	2.0	1.8	1.8	1.7	1.5	7-15	2600
Amsterdam, Concertgebouw	18.7	1.3	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	9-21	2200
Glasgow, St. Andrew's Hall	16.1	1.4	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.5	8-20	2100
Philadelphia, Academy of Music	15.7	1.7	1.4	1.7	1.45	1.35	1.25	1.15	10-19	3000
Bristol, Colston Hall	13.5	1.3	1.85	1.7	1.7	1.7	1.6	1.35	6-14	2200
Bruxelles, Palais des Beaux Arts	12.5	1.5	1.9	1.75	1.5	1.35	1.25	1.1	4-23	2200
Göteborg, Konzerthus	11.9	1.0	1.9	1.7	1.7	1.7	1.55	1.45	22-23	1400
Lipsia, Neues Gewandhaus	10.6	1.0	1.5	1.6	1.55	1.55	1.35	1.2	6-8	1600
Basilea, Stadt-Casino	10.5	0.9	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	6-16	1400
Cambridge (Mass.), Kresge Auditorium	10.0	1.0	1.65	1.55	1.5	1.45	1.35	1.25	10-15	1200
Buenos Aires, Teatro Colon	20.6	2.1	—	—	1.7	—	—	—	13-19	2800
New York, Metropolitan Opera	19.5	2.6	1.8	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	18-22	2800
Milano, Teatro alla Scala	11.2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.9	12-15	2500

Fig. 1.3. Tempi di riverberazione alle varie frequenze di alcune sale da concerto (da KINSLER, *Fundamentals of Acoustics* 4^a ed.).

Leo Beranek

1962: *Music, Acoustics and Architecture*

Analisi di 100 tra le più importanti *concert halls*.

Tentativo di classificazione delle sale da concerto utilizzando parametri oggettivi.



Il tempo di riverberazione è un parametro fondamentale, ma non è l'unico adatto a valutare l'acustica di un ambiente.

Introduzione di nuovi parametri per l'acustica ambientale

Altri parametri acustici

EDT - Early Decay Time

pari a sei volte il tempo di riverberazione calcolato sui primi 10 dB del decadimento sonoro

confronto con RT60: i due parametri dovrebbero essere identici se il decadimento fosse lineare, spesso però i valori di EDT sono inferiori a quelli di RT60

è un parametro più vicino dell'RT60 alla **percezione soggettiva della riverberazione**, alla **chiarezza** degli attacchi e ad altre sensazioni psicoacustiche soggettive

Criteri energetici

L'orecchio non riesce a distinguere separatamente suoni che si verificano molto ravvicinati nel tempo (50 ms parlato, 80 ms musica)

ENERGIA UTILE: arriva prima dei 50 ms dal suono diretto e i contributi delle riflessioni entro questo tempo si aggiungono al suono diretto

ENERGIA DANNOSA: arriva dopo i 50 ms dal suono diretto e oltre a non enfatizzare, può creare disturbi alla percezione sonora

Definizione - D50

indice di chiarezza per il parlato

$$D50 = \frac{\textit{Energia Utile}}{\textit{Energia Totale}} \qquad D50 = \frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

valori ottimali

ambienti adatti per il parlato $D50 > 0.5$

ambienti adatti per la musica $D50 < 0.5$

Chiarezza - C80

indice di chiarezza per la musica

$$C80 = 10 \log \frac{D80}{1 - D80} = 10 \log \frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{+\infty} p^2(t) dt}$$

espressa in dB

interpreta sensazioni soggettive legate alla percezione della **chiarezza** degli attacchi, **differenza** tra le varie voci, **trasparenza**, **localizzazione** della sorgente e definizione del suono

valori ottimali

ambienti per la musica sinfonica $C80 \approx 0$ dB

ambienti per la musica lirica $C80 \approx 1 \div 4$ dB

valori limite per la musica strumentale $C80 \approx -2 \div +2$ dB

Parametri di intelligibilità

RT60, C80, D50 possono essere buoni parametri per stimare l'intelligibilità della parola, ma non prendono in considerazione il livello del **rumore di fondo**.

Criteri specifici di intelligibilità:

STI (*Speech Transmission Index*)

RASTI (*RApid Speech Transmission Index*)

questi parametri permettono di misurare anche la “distanza critica” oltre la quale l'intelligibilità del parlato non è di qualità

valori: 0 (min) ÷ 1 (max)

valori ottimali sopra 0.75

Parametri legati alla spazialità

Studi soggettivi in Acustica Architettonica e Ambientale hanno mostrato che due parametri, la frazione di energia laterale (Lateral Energy Fraction, LF) e l'InterAural Cross-correlation Coefficient (IACC), si correlano bene con la qualità soggettiva di “impressione spaziale” di un ambiente acustico.

Frazione di Energia Laterale (Lateral Energy Fraction, **LF**)

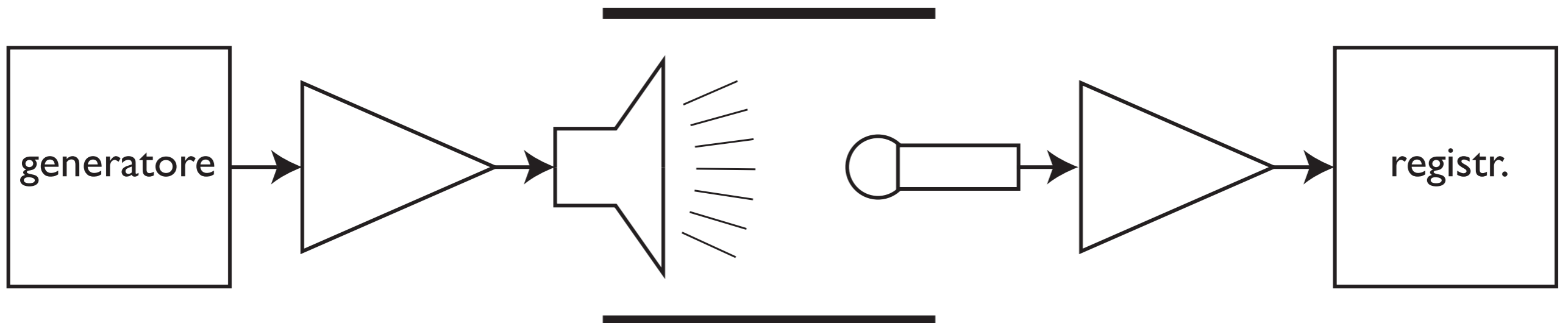
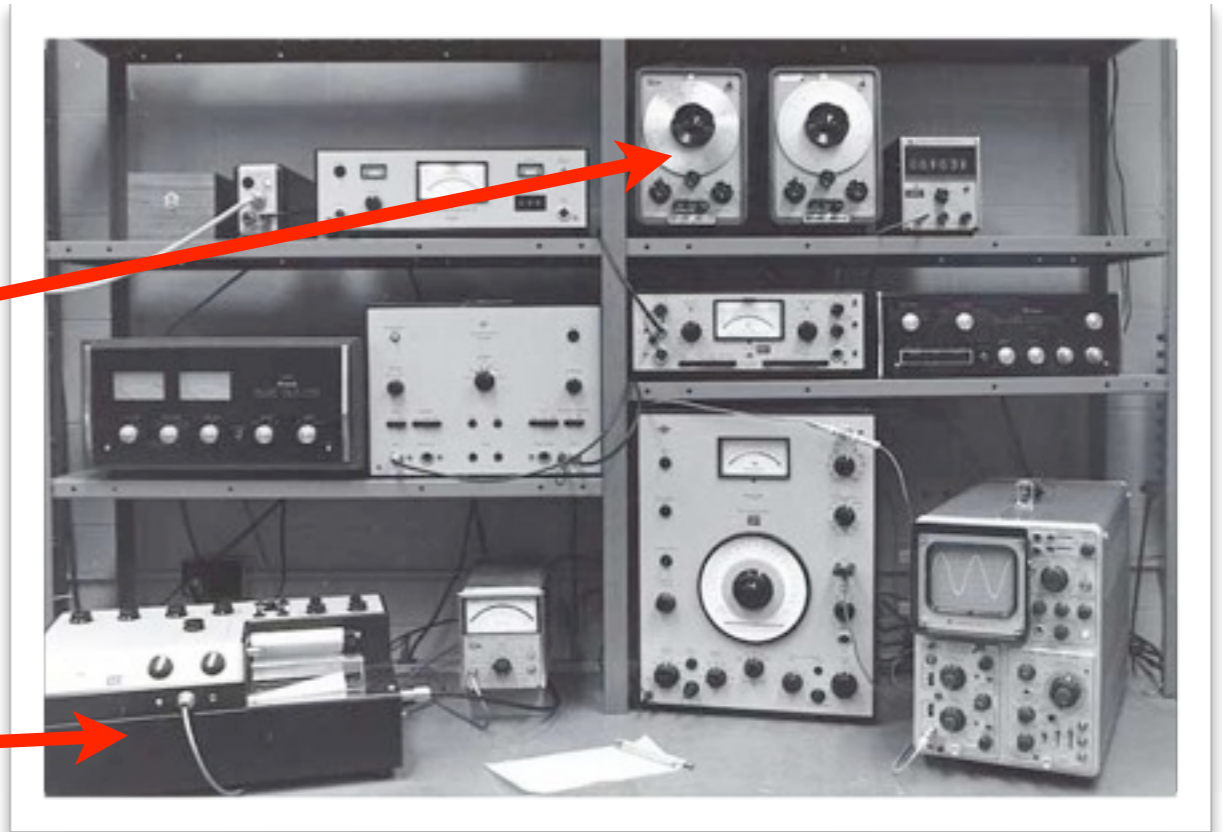
InterAural Cross-correlation Coefficient (**IACC**)

Metodi di misura



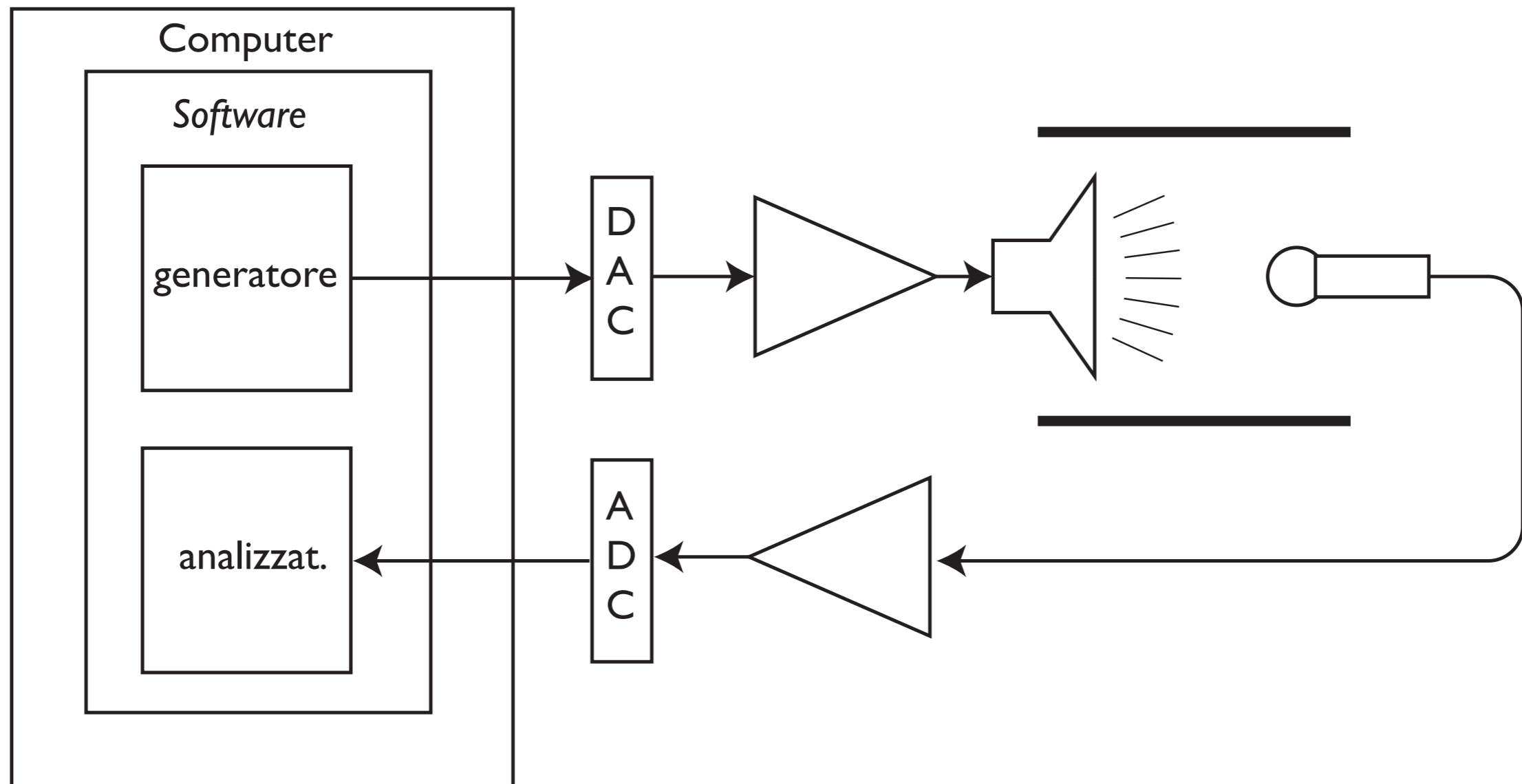
Strumentazione

Prima dell'avvento della tecnologia digitale si usavano generatori di segnali analogici e le misure erano visualizzate su registratori a carta



Strumentazione

Attualmente i segnali sono generati e analizzati nel dominio digitale, da opportuni *software* installati sul computer che controlla la misura.



Decadimento del suono stazionario interrotto

Si misura il decadimento sonoro dopo l'interruzione di un suono continuo prolungato.

I segnali di test vengono emessi tipicamente a 90 dB sonori e spesso il rumore di fondo raggiunge livelli di circa 20 ÷ 30 dB quindi risulta difficile stimare un decadimento di 60 dB per misurare l'RT60.

NORME ISO: RT60 è definito come due volte il tempo misurato in un decadimento da -5 a -35 dB sotto il valore iniziale del livello sonoro.

dato che le curve di decadimento spesso presentano doppie pendenze o curvature non trascurabili, questa definizione operativa non corrisponde con quella di Sabine.

Misura dell'RT60 a diverse frequenze

due metodi di misura:

1. **zona per zona**, usando segnali con contributi solo su una fascia ristretta di frequenze

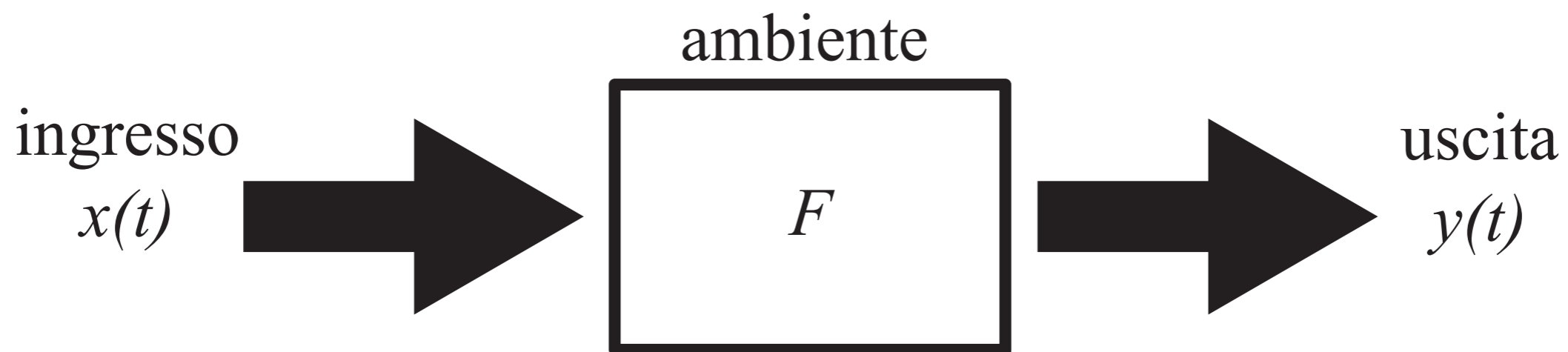
2. in un'**unica operazione**, usando segnali a larga banda ed analizzando spettralmente il segnale acquisito

il secondo metodo è molto più veloce ma la potenza viene dispersa su tutte le frequenze ed il rapporto segnale rumore si riduce

Tecniche impulsive

Si possono calcolare l'RT60 e tutti gli altri parametri se si è determinata direttamente o indirettamente la risposta dell'ambiente a un suono impulsivo.

Schematizzazione ambiente acustico come “scatola nera” la cui risposta è lineare e invariante nel tempo:



Risposta all'impulso

Per un sistema lineare e tempo-invariante la risposta $y(t)$ a un segnale qualsiasi $x(t)$ si può calcolare se si conosce la risposta $h(t)$ a un segnale impulsivo (Delta di Dirac) come convoluzione fra $x(t)$ e $h(t)$

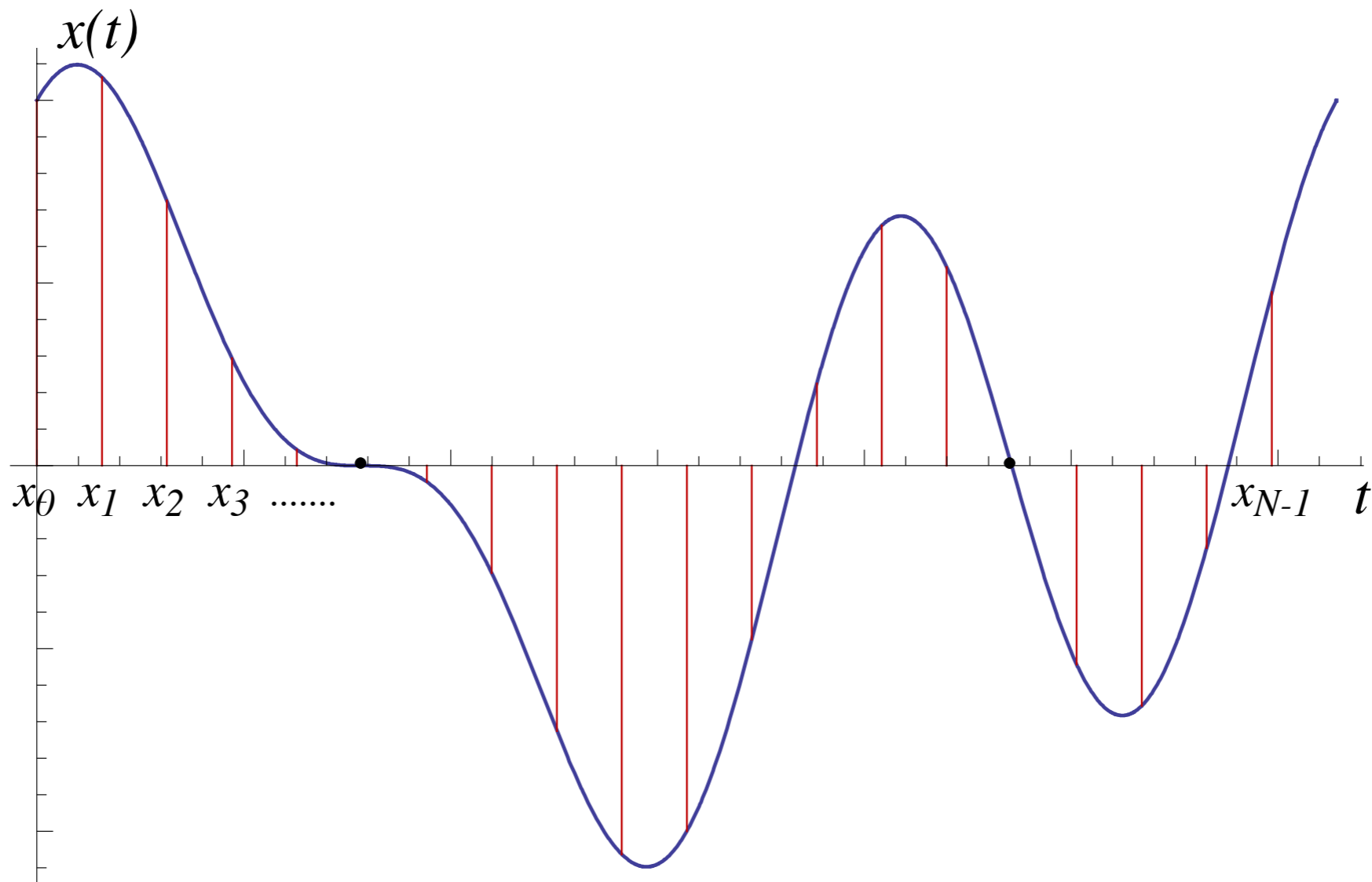
$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = x(t) * h(t)$$

Dominio discreto

Passando al dominio discreto, al posto di un segnale continuo $x(t)$ avremo una sequenza di valori campionati

$$\{x\}$$

$$x(t) \Rightarrow \{x_0, x_1 \dots x_{N-1}\} = \{x\}$$



Nel dominio discreto si può esprimere la risposta $\{y\}$ a un segnale $\{x\}$ tramite la convoluzione digitale con la risposta all'impulso $\{h\}$

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{y\} : y_i = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k h_{i-k}$$

dove si intendono le sequenze estese in entrambe le direzioni con valori nulli.

Un caso particolare si ha quando il segnale si ripete periodicamente con periodo N (o lo si estende idealmente in modo da considerarlo periodico) e la risposta all'impulso ha lunghezza $< N$. In questo caso

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} = \{x\} \hat{*} \{h\} \quad : \quad y_i = \sum_{k=0}^{N-1} x_k h_{\eta(i-k)}$$

dove l'operatore $\hat{*}$ rappresenta la convoluzione ciclica e

$$\eta(i-k) = \begin{cases} i-k & \text{se } i-k \geq 0 \\ N+i-k & \text{se } i-k < 0 \end{cases}$$

Nelle stesse condizioni si definisce anche la correlazione ciclica:

$$\{y\} = \{f\} \hat{\circ} \{g\} \quad : \quad y_i = \sum_{k=0}^{N-1} f_k g_{\eta(i+k)}$$

Da un punto di vista teorico,
misurando la risposta $\{h\}$ del sistema
a un impulso $\{\delta\}$ avremmo le
informazioni necessarie a
calcolare qualsiasi parametro fisico

Nel dominio digitale la determinazione della risposta all'impulso è particolarmente semplice

Il segnale in ingresso, quello in uscita e la risposta all'impulso sono legate tra loro:

$$\{y\} = \{x\} * \{h\} \quad \text{convoluzione digitale}$$

Conoscendo il segnale di ingresso (e la sua inversa) e misurando quello di uscita di un sistema si può determinare la sua IR:

$$\{y\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{x\} * \{x^{-1}\} = \{h\} * \{\delta\} = \{h\}$$

Basta quindi immettere come segnale di test una $\{\delta\}$ e registrare il segnale di uscita:

$$y_0 = 1 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_0$$

$$y_1 = 0 \cdot h_0 + 1 \cdot h_1 + 0 \cdot h_2 + \dots = h_1$$

$$y_2 = 0 \cdot h_0 + 0 \cdot h_1 + 1 \cdot h_2 + \dots = h_2$$

...

Perché non usare quindi sempre una $\{\delta\}$?

Il problema è legato all'impossibilità, per qualsiasi genere di altoparlante, di riprodurre un segnale impulsivo brevissimo e sufficientemente intenso senza considerevoli distorsioni in frequenza e fase.

Si introducono quindi varie tecniche che sfruttano sequenze continue e differenti algoritmi per ottenere l'IR:

Rumore bianco: segnale casuale con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz).

Rumore rosa: segnale casuale con stessa energia per ogni ottava, quindi con spettro piatto su tutto l'intervallo di frequenze considerato (20 ÷ 20000 Hz) in scala logaritmica. Le componenti a bassa frequenza hanno potenza maggiore.

Sequenze MLS

Sine-sweep

Deconvoluzione tramite DFT

Si passa dal dominio del tempo a quello delle frequenze usando la **trasformata di Fourier** e il **teorema della convoluzione**

$$\mathcal{DF} [\{y\}] = \{Y\} = \mathcal{DF} [\{x\} \hat{*} \{h\}] = \{X\}\{H\}$$

$$\mathcal{DF}^{-1} [\{H\}] = \mathcal{DF}^{-1} \left[\frac{\{Y\}}{\{X\}} \right] = \{h\}$$

$\{H\}$ funzione di trasferimento

$\{h\}$ risposta all'impulso IR

Misura dell'IR con sequenze MLS

(Maximum Length Sequence)

Segnale pseudo-casuale

Proprietà del segnale MLS: tramite la correlazione ciclica con se stesso si produce la sequenza $\{\delta\}$.

Utilizzando una sequenza MLS in ingresso, campionando l'uscita ed effettuando una correlazione circolare tra i due, si ottiene l'IR:

$$\text{se } \{y\} = \{h\} \hat{*} \{x\} \quad \text{e} \quad \frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} = \{\delta\}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{N} \{y\} \hat{\circ} \{x\} = \{h\} \hat{*} \left[\frac{1}{N} \{x\} \hat{\circ} \{x\} \right] = \{h\} \hat{*} \{\delta\} = \{h\}$$

il segnale deve essere più lungo dell'IR ed emesso almeno 2 volte per raggiungere la situazione di regime

PRO dell'MLS

- Si può calcolare la correlazione circolare con la trasformata veloce di Hadamard (FHT).
- MLS è un segnale deterministico: ripetendo la misura ed effettuando una serie di medie del segnale in uscita si fa aumentare il rapporto segnale-rumore di 3 dB ogni volta che si raddoppia il numero di medie.

CONTRO dell'MLS

- Dipendenza dalla non linearità del sistema. Se il sistema non è perfettamente lineare appaiono “artefatti” sistematici che non possono essere diminuiti neanche mediando più misure.
- Se le sequenze sono più lunghe si aumenta il rapporto s/r, ma se sono troppo lunghe gli effetti dovuti ad una non perfetta tempo-invarianza diventano predominanti.

Misura dell'IR con *sine-sweep*

sine-sweep: segnale sinusoidale a frequenza variabile.

È ad oggi la tecnica più efficiente per il calcolo dell'IR.

sweep lineare

$$x(t) = \sin \left[2\pi \left(f_{inf} \cdot t + \frac{f_{sup} - f_{inf}}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right) \right]$$

sweep esponenziale

$$x(t) = \sin \left[\frac{2\pi f_{inf} \cdot T}{\ln \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left(\frac{f_{sup}}{f_{inf}} \right)} - 1 \right) \right]$$

PRO del *sine-sweep*

- Il segnale inverso dello sweep è proprio esso stesso invertito sull'asse dei tempi. Quindi con il segnale invertito e il segnale di uscita sarà possibile calcolare l'IR con un'operazione di deconvoluzione.
- La risposta ad un singolo *sweep* non ripetuto è pressoché uguale a quella che si ha con una ripetizione periodica: non è necessario emettere il segnale di test 2 volte. Si dimezzano i tempi di misura.
- Ottimo rapporto s/r (circa 20 dB meglio dell'MLS).
- Il *sine-sweep* è molto meno soggetto ad artefatti causati dalla non perfetta linearità e tempo-invarianza del sistema

CONTRO del *sine-sweep*

- maggiore complessità dell'algoritmo di analisi, richiede maggiore potenza di calcolo rispetto alle altre tecniche.

IR e RT60

I tempi di riverberazione misurati direttamente dal decadimento della risposta all'impulso sono leggermente inferiori a quelli prodotti dal decadimento da rumore stazionario e non coincidono con la definizione data da Sabine.

Con l'emissione di un suono impulsivo non si raggiunge la densità di energia sonora di regime in tutto l'ambiente.

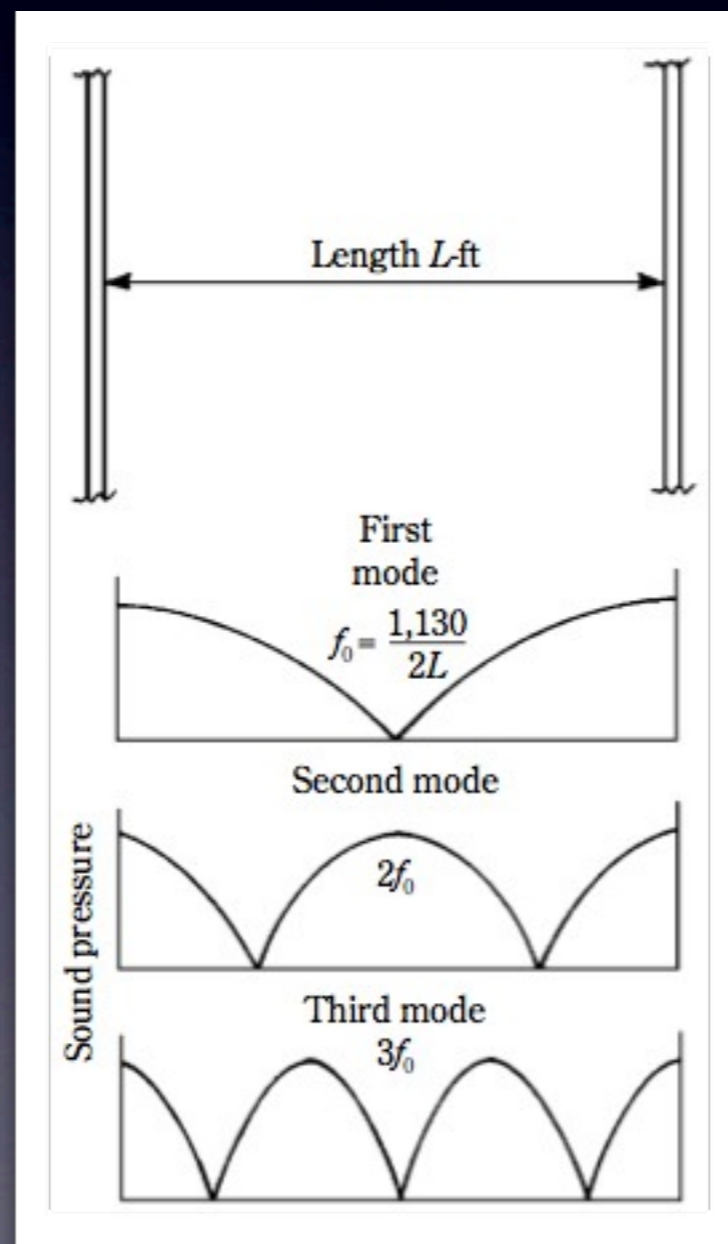
La legge di decadimento riverberante è ricostruibile attraverso un integrale della risposta all'impulso:

Integrale di Schroeder
$$S(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt$$

che corrisponde all'energia che rimane nell'IR al tempo t.

Mettendo in grafico il rapporto espresso in dB tra l'integrale di Schroeder e il massimo valore misurato al $t = 0$ si deriva una curva di decadimento analoga a quella che si ottiene con il decadimento del rumore stazionario interrotto.

Risonanze modali e onde stazionarie



Divisione spettro udibile

- REGIONE X: non c'è rinforzo modale
- REGIONE A: modi normali (onde acustiche - *wave acoustics*)
- REGIONE B: fenomeni di diffrazione e diffusione (regione transizione)
- REGIONE C: riflessione speculare (raggi acustici - *ray acoustics*)

X

A

B

C

20 Hz

modo
più basso

$$f = 1905 \cdot \sqrt{\frac{T}{V}}$$

4 volte f

20 kHz

T il tempo di riverberazione in secondi
 V il volume del locale in metri cubi

Esempio stanza 6.7 x 5.5 x 4.3 m

Regione X : da 0 a 26 Hz

Regione A : da 26 a 107 Hz

Regione B : da 107 a 428 Hz

Regione C : da 428 a 20000 Hz.

Effetto della misura del locale

- riducendo il volume del locale, aumenta il limite inferiore della regione A e quindi si impoverisce la risposta dell'ambiente alle basse frequenze
- più il locale è piccolo, più è ampia la porzione dello spettro udibile dominata dalle risonanze modali
- in tal caso le frequenze di risonanza risulteranno sempre più spaziate causando irregolarità nella risposta della stanza ed un aumento della colorazione del suono

Wave Acoustics

Ogni locale può essere modellizzato come un risonatore acustico complesso, avente un infinito numero di modi di vibrazione, ciascuno con una ben precisa frequenza di risonanza: ogniqualvolta una di queste frequenze viene prodotta all'interno del locale, ne risulterà una corrispondente onda stazionaria.

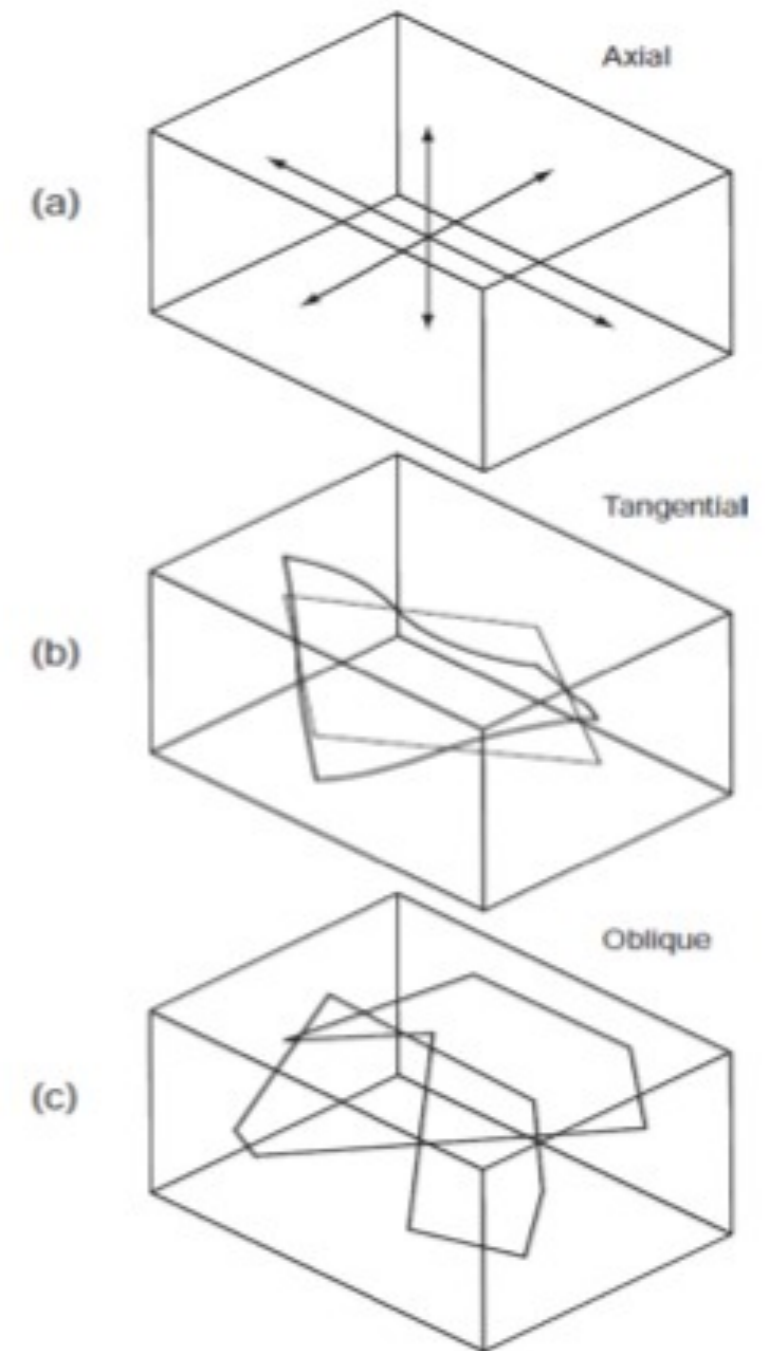
E' dimostrabile che l'aria racchiusa in una stanza rettangolare possiede un infinito numero di modi normali di vibrazione. Le frequenze alle quali occorrono sono date dall'equazione:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2}$$

c	la velocità del suono, 344 m/s
L	la lunghezza del locale in metri
W	la larghezza del locale in metri
H	l'altezza del locale in metri
p, q, r	gli interi 0,1,2,3... n

Analisi Modale

- Si calcolano le frequenze modali basandosi sulle dimensioni delle pareti rigide del locale
- Uso di un programma di calcolo che sostituisca valori crescenti agli indici p, q, r , in sequenza
- ordina i risultati dalla frequenza più piccola alla più grande
- numerare i modi e ne descriva il tipo contando il numero di zeri presenti negli indici p, q, r



Calcolo delle Risonanze Modali in stanze rettangolari

DIMENSIONI DEL LOCALE IN METRI

Lunghezza : 9.1

Larghezza : 7.6

Altezza : 5.9

=====> Volume 408.04 [m³]

Proporzioni 1:1.29:1.54

Indici Modali da valutare: 0..4

=====> Modi : 125

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
1	18.901	0.0 90.0 90.0	90.0	1	0	0	A
2	22.632	90.0 0.0 90.0	90.0	0	1	0	A
3	29.153	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	1	A
4	29.486	50.1 39.9 90.0	90.0	1	1	0	T
5	34.744	57.0 90.0 33.0	33.0	1	0	1	T
6	36.906	90.0 52.2 37.8	37.8	0	1	1	T
7	37.802	0.0 90.0 90.0	90.0	2	0	0	A
8	41.465	62.9 56.9 45.3	45.3	1	1	1	O
9	44.059	30.9 59.1 90.0	90.0	2	1	0	T
10	45.263	90.0 0.0 90.0	90.0	0	2	0	A
11	47.738	37.6 90.0 52.4	52.4	2	0	1	T
12	49.051	67.3 22.7 90.0	90.0	1	2	0	T
13	52.831	44.3 64.6 56.5	56.5	2	1	1	O
14	53.839	90.0 32.8 57.2	57.2	0	2	1	T
15	56.703	0.0 90.0 90.0	90.0	3	0	0	A
16	57.060	70.7 37.5 59.3	59.3	1	2	1	O
17	58.305	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	2	A
18	58.973	50.1 39.9 90.0	90.0	2	2	0	T
19	61.053	21.8 68.2 90.0	90.0	3	1	0	T
20	61.292	72.0 90.0 18.0	18.0	1	0	2	T
21	62.543	90.0 68.8 21.2	21.2	0	1	2	T
22	63.758	27.2 90.0 62.8	62.8	3	0	1	T
23	65.337	73.2 69.7 26.8	26.8	1	1	2	O
24	65.785	54.9 46.5 63.7	63.7	2	2	1	O
25	67.656	33.1 70.5 64.5	64.5	3	1	1	O
26	67.895	90.0 0.0 90.0	90.0	0	3	0	A

Modo	Frequenza	Angoli xyz	Rifl.	p	q	r	Tipo
27	69.487	57.0 90.0 33.0	33.0	2	0	2	T
28	70.477	74.4 15.6 90.0	90.0	1	3	0	T
29	72.554	38.6 51.4 90.0	90.0	3	2	0	T
30	73.080	58.9 72.0 37.1	37.1	2	1	2	O
31	73.812	90.0 52.2 37.8	37.8	0	2	2	T
32	73.889	90.0 23.2 66.8	66.8	0	3	1	T
33	75.604	0.0 90.0 90.0	90.0	4	0	0	A
34	76.194	75.6 53.6 40.1	40.1	1	2	2	O
35	76.268	75.7 27.1 67.5	67.5	1	3	1	O
36	77.709	60.9 29.1 90.0	90.0	2	3	0	T
37	78.191	43.5 54.6 68.1	68.1	3	2	1	O
38	78.919	16.7 73.3 90.0	90.0	4	1	0	T
39	81.030	21.1 90.0 68.9	68.9	4	0	1	T
40	81.331	45.8 90.0 44.2	44.2	3	0	2	T
41	82.929	62.9 56.9 45.3	45.3	2	2	2	O
42	82.997	62.9 35.1 69.4	69.4	2	3	1	O
43	84.131	26.0 74.4 69.7	69.7	4	1	1	O
44	84.421	47.8 74.5 46.3	46.3	3	1	2	O
45	87.458	90.0 90.0 0.0	0.0	0	0	3	A
46	88.118	30.9 59.1 90.0	90.0	4	2	0	T
47	88.459	50.1 39.9 90.0	90.0	3	3	0	T
48	89.477	77.8 90.0 12.2	12.2	1	0	3	T
49	89.494	90.0 40.7 49.3	49.3	0	3	2	T
50	90.338	90.0 75.5 14.5	14.5	0	1	3	T
51	90.526	90.0 0.0 90.0	90.0	0	4	0	A
52	91.468	78.1 42.1 50.4	50.4	1	3	2	O
53	92.295	78.2 75.8 18.6	18.6	1	1	3	O
54	92.478	78.2 11.8 90.0	90.0	1	4	0	T
55	92.815	35.5 60.8 71.7	71.7	4	2	1	O
56	93.078	52.5 60.9 51.2	51.2	3	2	2	O
57	93.139	52.5 43.2 71.8	71.8	3	3	1	O
58	95.105	90.0 17.9 72.1	72.1	0	4	1	T
59	95.278	66.6 90.0 23.4	23.4	2	0	3	T
60	95.475	37.6 90.0 52.4	52.4	4	0	2	T
61	96.965	78.8 21.0 72.5	72.5	1	4	1	O
62	97.150	67.1 45.7 53.1	53.1	2	3	2	O
63	97.929	67.3 76.6 26.7	26.7	2	1	3	O
64	98.102	67.3 22.7 90.0	90.0	2	4	0	T
65	98.121	39.6 76.7 53.5	53.5	4	1	2	O
66	98.476	90.0 62.6 27.4	27.4	0	2	3	T
67	100.274	79.1 63.2 29.3	29.3	1	2	3	O
68	101.616	41.9 48.1 90.0	90.0	4	3	0	T
69	102.342	68.3 27.8 73.4	73.4	2	4	1	O
70	104.231	57.0 90.0 33.0	33.0	3	0	3	T
71	105.483	69.0 64.6 34.0	34.0	2	2	3	O
72	105.661	44.3 64.6 56.5	56.5	4	2	2	O

Plot del numero dei modi nelle diverse bande di frequenza

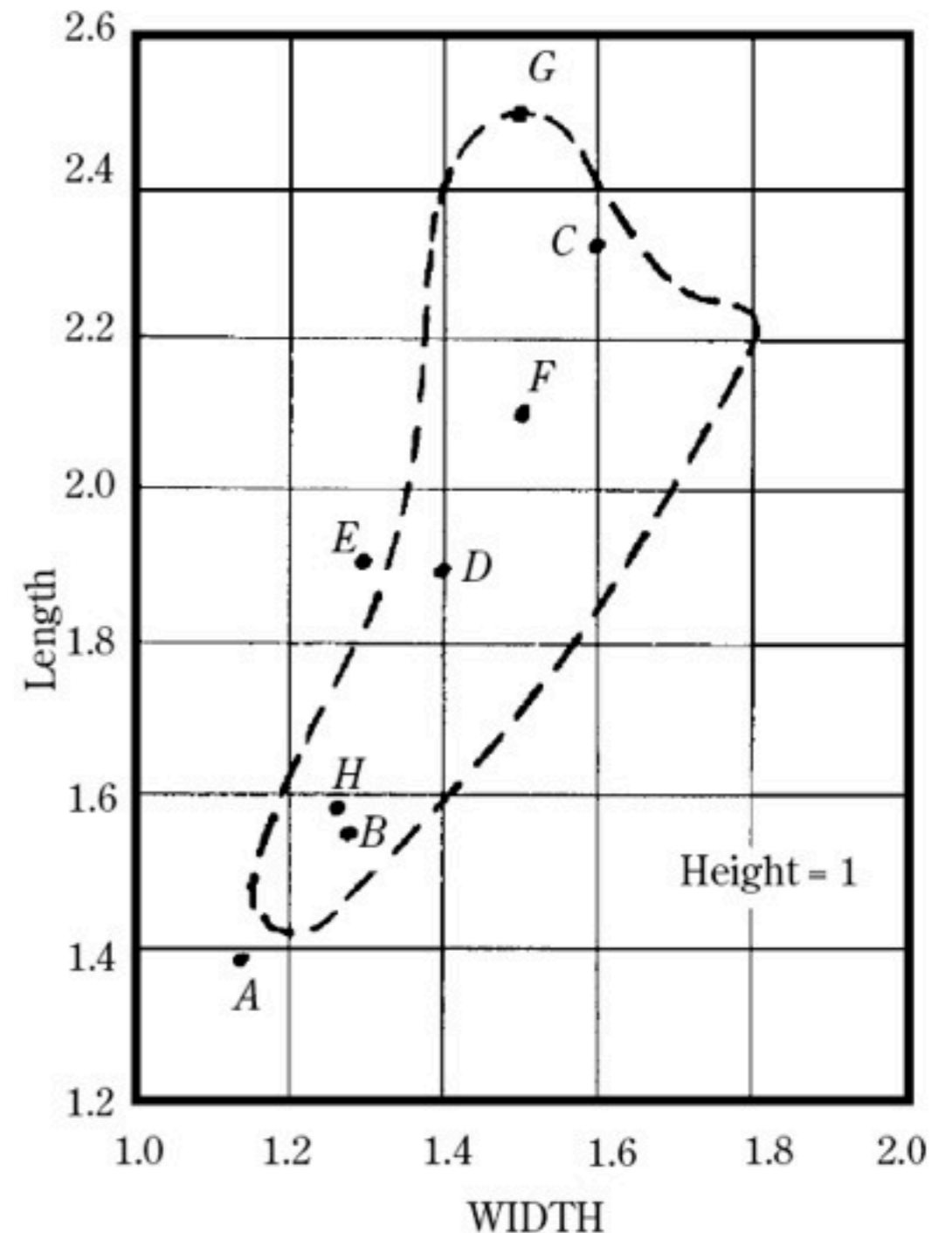
Lo step successivo è quello di studiare le dimensioni degli ambienti sulla base della distribuzione modale e quindi trovare le proporzioni migliori e degli standards

Banda [Hz]	Modi
10... 13	0
13... 16	0
16... 20	1 *
20... 25	1 *
25... 32	2 **
32... 40	3 ***
40... 50	5 *****
50... 63	9 *********
63... 80	17 *****
80... 100	28 *****
100... 125	32 *****
125... 160	25 *****
160... 200	1 *

Proporzioni per locali rettangolari

	Altezza	Larghezza	Lunghezza
A	1.00	1.14	1.39
B	1.00	1.29	1.54
C	1.00	1.60	2.33

Area di Bolt



Modi per locali non rettangolari

- Alle frequenze superiori, la densità modale è così elevata che le variazioni di pressione sonora rispetto ad un locale rettangolare sono piccole. L'unico vantaggio conseguito è l'eliminazione delle fluttuazioni sonore dovute ad effetti di eco.
- Un locale non rettangolare non dà una distribuzione modale più regolare di quella fornita da un locale rettangolare che rispetti le proporzioni ottimali. (Ma solitamente non è così facile rispettarle...)

Bibliografia e testi di riferimento

- D. Masci: “Parametri Fisici dell’Acustica Ambientale” tesi
- A. Everest: “The Master Handbook of Acoustics” 4th ed.
- L. Beranek: “Concert Halls and Opera Houses - Music, Acoustics, and Architecture” 2nd ed.
- L.E. Kinsler: “Fundamentals of Acoustics” 4th ed.
- M. Long: “Architectural Acoustics”
- D. Egan: “Architectural Acoustics”
- T.J. Cox, P. D’Antonio: “Acoustic Absorbers and Diffusers -