UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA – DIPTEM
Dipartimento di Ingegneria della Produzione, Termoenergetica e Modelli Matematici

Sezione di TermoEnergetica e Condizionamento ambientale

Appunti del corso
di
IMPIANTI OSPEDALIERI
Modulo 2 (1°Semestre)

Per il Corso di Laurea Magistrale in
Bioingegneria
Indirizzo salute

Prof. L. A. Tagliafico

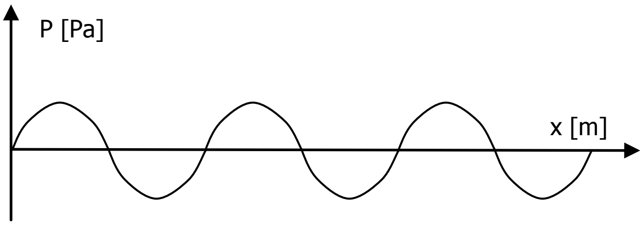
Nozioni di Acustica Applicata

Anno Accademico 2010/2011

INDICE

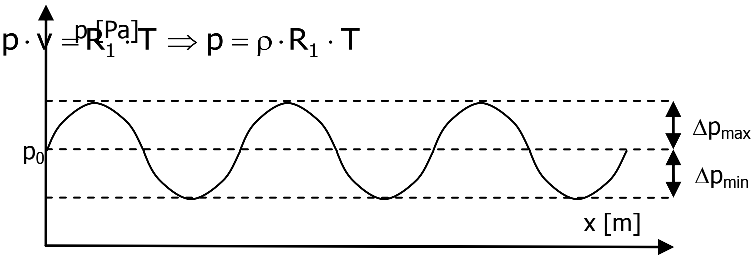
Pressione e livelli acustici (definizioni)

Il suono è una successione di compressioni e rarefazioni in un mezzo, associate a oscillazioni di pressione; alla compressione è associata una variazione di pressione positiva, alla rarefazione una negativa.



In figura è disegnato un esempio di compressioni e rarefazioni. Il mezzo è un materiale qualsiasi dove il suono si può propagare: gas, liquido, solido. È di particolare interesse la propagazione del suono nell' aria. A differenza dell'energia raggiante (ad esempio la luce), il suono non si propaga nel vuoto. Per capire l' origine del suono, si può pensare al movimento di un pistone in aria (un esempio reale è il movimento del 'cono' di un altoparlante di una cassa acustica). Quando il pistone avanza incontra zone ad alta densità, quando arretra incontra zone a bassa densità. Ricordiamo l' equazione dei gas perfetti:

$$p \cdot v = R_1 \cdot T \Rightarrow p = \rho \cdot R_1 \cdot T$$



Fissato il mezzo (parametro R_1) e la temperatura T, la pressione p e la densità ρ sono direttamente proporzionali: se aumenta ρ aumenta anche p. L' onda acustica è generata dall' oscillazione di pressione intorno a un valore medio p_0, che provoca a sua volta oscillazioni di densità. Nell'aria il valore medio è la pressione atmosferica (p_0=1 bar). In generale, le oscillazioni di pressione sono dell' ordine dei 10^{-5} Pa e non dell' ordine dei bar (sarebbe intollerabile per l' udito umano). Allora, non ha importanza il valore assoluto di pressione, ma diventano critiche le variazioni di pressione Δp. Il campo di variazioni delle pressioni va da Δp_{min} a Δp_{max} come indicato in figura, e sarà in generale $\Delta p = p - p_0$. Δp_{max} può variare tra $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (soglia di udibilità) fino a 200 Pa (soglia del dolore: superandola, si ha la rottura del timpano). È da notare che i valori assoluti Δp sono piccoli: il massimo di 200 Pa equivale a una colonna d' acqua di 2 cm. Possiamo ricavare questa valutazione dalla relazione tra differenza di pressione Δp e variazione di altezza Δh, sostituendo gli opportuni valori numerici:

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h \Rightarrow \Delta h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} = \frac{200\, N \cdot m^{-2}}{1000\, kg \cdot m^{-3} \cdot 9.81\, m \cdot s^{-2}} \cong 2 \cdot 10^{-2}\ m = 2\, cm$$

Una pressione **dinamica** di soli 2 cm d' acqua provoca la rottura del timpano, mentre la stessa pressione **statica** è appena percettibile. Applicando il secondo principio della dinamica, l' equazione di conservazione della massa, l' ipotesi che la propagazione del suono sia adiabatica e l' equazione dei gas perfetti si arriva all' equazione di D' Alambert:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2}$$

Il parametro c è la velocità di propagazione dell' onda nel mezzo. Se il mezzo è l' aria, c=340 m/s. Si può dimostrare che la velocità di propagazione si può esprimere come:

$$c = \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_{S=costante}}$$

Tenendo conto di come è definito il modulo di comprimibilità isoentropico E_S si può scrivere un' altra espressione per la velocità di propagazione:

$$E_S = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_S = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_S \Rightarrow c = \sqrt{\frac{E_S}{\rho}}$$

La formula si può adattare ai gas perfetti usando la relazione $E_S \cong 3 \cdot E$, dove E è il modulo di Young. La tabella seguente riporta la velocità di propagazione dell' onda acustica in alcuni materiali.

MATERIALI	E	ρ	c teorica	c reale
Aria (secca, 15 °C)	$5 \cdot 10^4$	1.2	353	341
Acqua	$8 \cdot 10^8$	1000	1500	1460
Marmo	$1.5 \cdot 10^{10}$	2800	4000	3800
Mattoni	10^{10}	3000	3163	3650
Vetro	$2 \cdot 10^{10}$	2500	4900	5000
Ferro	$7 \cdot 10^{10}$	8000	5010	5000
Sughero	$7 \cdot 10^6$	60	580	500
Gomma elastica	$5 \cdot 10^5$	1000	39	30÷70

La velocità di propagazione aumenta all' aumentare della temperatura. Questo fatto si può dimostrare partendo dalle equazioni $T \cdot ds$. Dato che siamo in condizioni isoentropiche è $T \cdot ds = 0$ perché $ds = 0$.

$$\begin{matrix} Tds = du + pdv \\ Tds = dh - vdp \end{matrix} \Rightarrow \frac{du}{dh} = -\frac{p}{v} \cdot \frac{dv}{dp}$$

Nell' ultima espressione, sostituiamo le equazioni caratteristiche dei gas perfetti:

$$\begin{matrix} du = c_v \cdot dT \\ dh = c_p \cdot dT \end{matrix} \Rightarrow -v\frac{dp}{dv} = p\frac{c_p}{c_v}$$

Il modulo di comprimibilità E_S precedente si può sostituire con questa relazione. Riscrivendo poi la velocità di propagazione si ottiene l' uguaglianza seguente valida solo per i gas perfetti:

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot c_p / c_v}{\rho}} = \sqrt{\frac{k \cdot p}{\rho}} \text{ con } k = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$$

Vediamo come si arriva al valore 1.4. Dalla termodinamica per i gas biatomici valgono le relazioni seguenti:

$$c_v = \frac{5}{2}R, \quad c_p - c_v = R, \quad c_p = \frac{7}{2}R$$

Dividendo le due capacità termiche (la massa molecolare viene comunque eliminata) si ottiene proprio 1.4. Dall'equazione dei gas perfetti (pagina precedente) si ottiene:

$$\frac{1}{\rho} = v \Rightarrow c = \sqrt{kpv} = \sqrt{kR_1T} = \sqrt{kR_1} \cdot \sqrt{T}$$

Differenziando a sinistra rispetto a c e a destra rispetto a T si ottiene:

$$dc = \sqrt{kR_1} \cdot d\sqrt{T} = \sqrt{kR_1} \cdot \frac{1}{2\sqrt{T}} dT \cong \frac{1}{2}\sqrt{1.4 \cdot 287}\frac{dT}{\sqrt{T}} \cong 10\frac{dT}{\sqrt{T}}$$

Per l' aria si può affermare che:

$$c = c(273K) + \sqrt{\frac{1.4}{4}} \cdot dT = 331.4 + 0.6(T - T_0)$$

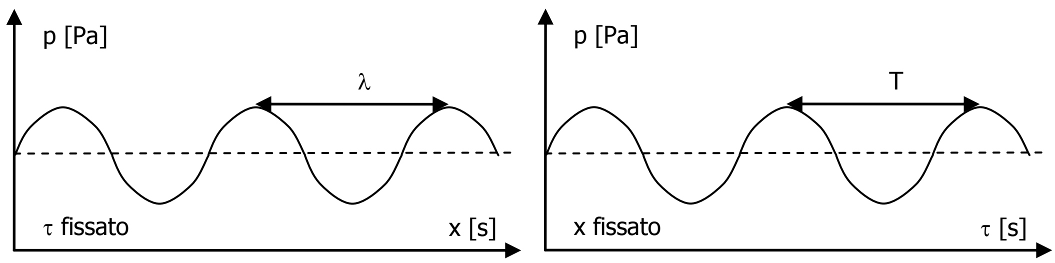
Si vede subito che, fissata la temperatura di riferimento (T_0=273 K), la velocità di propagazione c aumenta all' aumentare della temperatura. L' equazione di D' Alambert è risolta da equazioni del tipo:

$$p(x,\tau) = f_1(x + c\tau) + f_2(x - c\tau) = f_3\left(\tau + \frac{x}{c}\right) + f_4\left(\tau - \frac{x}{c}\right)$$

Nella seconda versione è stato messo in evidenza il tempo. Il termine f_4 (onda primaria) rappresenta un' onda piana che si propaga nel verso delle x crescenti, mentre f_3 (onda secondaria) è un' onda che si propaga in senso contrario (ad esempio se l' onda primaria incontra una superficie riflettente). Dalle equazioni Tds precedenti si deduce che le onde possono avere forme molto diverse tra loro. Ad esempio, si può immaginare una soluzione di tipo sinusoidale:

$$p(x,\tau) = p_{max} \cdot \text{sen}[k(x - c\tau)], \text{ con } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c}$$

Il parametro k è il numero d' onda. Si possono definire le seguenti caratteristiche:



λ [m] è la lunghezza d' onda e rappresenta la distanza tra due punti omologhi; T è l'intervallo di tempo trascorso nel passaggio di due punti omologhi; f è la frequenza, cioè il numero di onde complete passate in un periodo e si misura in Hertz (f=1/T); c è la velocità di propagazione nel mezzo e dipende dalle proprietà del mezzo. Dalle funzioni che risolvono l' equazione di D' Alambert, e in particolare da quella sinusoidale, si può definire anche la funzione che esprime la velocità della "particella fluida":

$$u(x,\tau) = \frac{p_{max}}{\rho_0 c} \cos\left[\omega\left(\tau - \frac{x}{c}\right)\right]$$

Proprietà

Le tre proprietà più rilevanti dell' onda acustica sono:

- ALTEZZA (parametro legato alla frequenza)
- INTENSITÀ (parametro legato alla quantità propria di energia che si propaga in un mezzo)
- TIMBRO (parametro legato alla qualità dell' onda acustica)
- DENSITÀ (parametro legato all' energia per unità di volume associata a un' onda acustica)

L' altezza è legata alla differenza di frequenza tra un' onda e l' altra. Una nota bassa ha un' oscillazione molto lenta (frequenza bassa) e viceversa una nota alta oscilla molto (frequenza alta).

L' intensità si definisce come rapporto:

$$I = \frac{\Pi}{A} = \frac{p_{eff}^{\,2}}{\rho c}$$

dove Π [W] è la potenza dell' onda acustica, A [m^2] è la superficie su cui l'onda acustica va a incidere normalmente e p_{eff} è la pressione efficace. Pertanto, l' intensità si misura in [W/m^2]. Si può definire l' intensità sonora media come:

$$\bar{I} = \frac{1}{T}\int_0^T p(\tau)u(\tau)d\tau$$

dove u è la velocità della particella fluida. Nel caso di un' onda piana progressiva si può definire la pressione efficace e scrivere l'espressione dell' intensità media come:

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T p^2(\tau)d\tau} \Rightarrow \bar{I} = \frac{1}{\rho_0 c}\cdot\frac{1}{T}\int_0^T p^2(\tau)d\tau = \frac{p_{eff}^{\,2}}{\rho_0 c}$$

Il timbro è una grandezza usata in campo musicale. I vari strumenti musicali si differenziano per la purezza più o meno accentuata della forma riprodotta. Uno strumento a fiato come la tromba produce un suono puro (cioè una vera sinusoide). Invece, la voce umana è la sovrapposizione di un suono puro (prodotto dalla corda vocale) e di suoni spuri (prodotti da cavità orale, polmoni, …). Il pianoforte genera una nota costituita dalla lunghezza d' onda della corda premuta, ma anche dalla risposta meccanica della cassa in cui la corda è inserita.

Nello studio delle proprietà del suono, intensità e densità hanno importanza diversa. In campo aperto è fondamentale conoscere l' andamento dell' intensità, mentre in campi confinati è più rilevante la densità. Infatti, in campo aperto si studia sempre un' onda diretta, che arriva dalla sorgente e attraversa direttamente la superficie interessata. Viceversa, in ambiente chiuso bisogna anche tenere conto delle onde riflesse dalle pareti.

Livelli acustici

Nei discorsi introduttivi è emerso che non ha importanza la pressione assoluta, ma piuttosto la differenza di pressione. Si può fare lo stesso ragionamento per studiare la "sensazione" prodotta da un suono sull' orecchio umano. Dalla legge di Fick si può dimostrare che: Δsensazione $\cong$ Δsegnale/segnale. In parole, la variazione della sensazione uditiva è proporzionale alla variazione del segnale considerato rispetto a un segnale di riferimento. Definiamo L il livello di intensità di un suono. Integrando la relazione si ha:

$$L_p = L_0 + \ln \frac{\text{segnale}}{\text{segnale di riferimento}}$$

Se il segnale è l' intensità acustica I, passando al logaritmo in base 10 si definisce:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_{rif}} \text{ con } I_{rif} = \frac{(p_{eff})_{rif}^2}{\rho_{rif} c} = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

Il valore I_{rif} è la soglia di udibilità a 1000 Hz. Dalla definizione di L si può ricavare anche il livello di intensità o di pressione di un suono sostituendo l' espressione dell' intensità:

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log_{10} \frac{\frac{p^2}{\rho c}}{\frac{p_0^2}{(\rho c)_0}}$$

Il pedice 'rif' è stato sostituito con '0', ed è stato omesso il pedice 'eff'. Facendo coincidere ρc con $(\rho c)_0$ si ottiene:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$$

Il parametro L_p è il livello di intensità sonora (o pressione sonora). Il livello di intensità sonora si misura in decibel [dB]. In modo analogo si può definire il livello di potenza sonora:

$$L_W = 10 \log_{10} \frac{W}{W_0}$$

dove $W_0=10^{-12}$ W. Prima di affrontare l' analisi spettrale proponiamo un esercizio sul calcolo dei livelli di intensità sonora di una sorgente, dove sono coinvolte le normative attualmente in vigore sul rumore acustico.

Esercizio

Valutare i livelli di intensità sonora e di potenza sonora relativi a una sorgente da 100 W alla distanza di un metro.

Per l' intensità, la superficie interessata è una sfera di raggio 1 m, la cui superficie è quindi $4\pi r^2=4\pi$. I due valori richiesti sono:

$L_j=10 \log_{10}[100/(4\pi)/10^{-12}]=129$ dB $\qquad L_w=10 \log_{10}(100/10^{-12})=140$ dB

Raddoppiando la potenza si ha: $L_j=10 \log_{10}[200/(4\pi)/10^{-12}]=132$ dB. Il livello sonoro aumenta di soli 3 dB. In generale, le normative si riferiscono ai livelli di intensità sonora e non di potenza, perché influiscono direttamente sulla percezione dell' orecchio umano. Alcuni riferimenti normativi sono:

DPCM 1.3.91 – RUMORE NELLE AREE ESTERNE
DPR 277 15.08.91 – RUMORE NEGLI AMBIENTI DI LAVORO
LEGGE REGIONALE 31 DEL 4.7.94 – ZONIZZAZIONE DEL TERRITORIO E CONTENIMENTO E RIDUZIONE DELL' INQUINAMENTO ACUSTICO
Limiti esterni: max 50 – 70 dB diurni, 40 – 70 dB notturni

Osservazione – dato che le norme si riferiscono a valori di livelli di **intensità**, sono molto importanti sia la posizione del rilevamento (1.2 m da terra e da eventuali ostacoli), sia il tempo di integrazione (2 – 3 minuti).

I limiti di sopportabilità sono:
<80 dB ⇒ sopportabile
80 – 85 dB ⇒ è obbligatoria una opportuna informazione del lavoratore sui rischi che può subire l' udito per esposizione prolungata
85 – 90 dB ⇒ oltre all' informazione è necessaria la fornitura di appositi DPI per l' attenuazione del rumore
>90 dB ⇒ non sono ammessi
120 dB ⇒ soglia del dolore – sordità.

Analisi spettrale del suono

I suoni sono costituiti dall' insieme di più onde acustiche, ognuna con singola frequenza f. Lo spettro delle frequenze si può suddividere come segue:

$f < 20$ Hz $\Rightarrow$ infrasuoni
$20 \leq f < 20000$ Hz $\Rightarrow$ campo dell' udibile
$f > 20000$ Hz $\Rightarrow$ ultrasuoni

Uno dei pochi strumenti che emettono suoni puri è la tromba; gli altri emettono una composizione di suoni (perché bisogna considerare le vibrazioni delle strutture dei materiali) con un relativo spettro di frequenze. Per un suono puro la forma d' onda è una sinusoide:

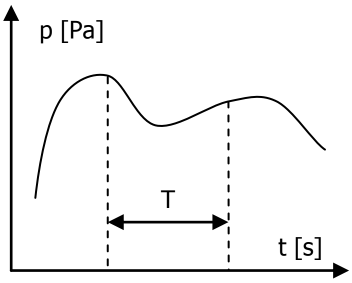
$$p(\tau) = p_0 + p' \cdot \mathrm{sen}(\omega\tau)$$

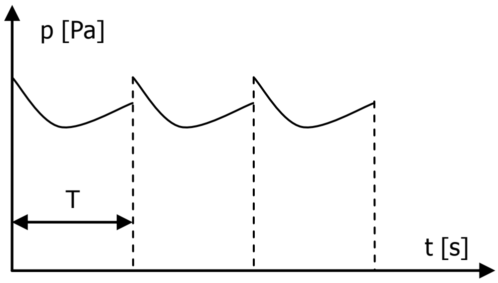
con $\omega=2\pi/T$, e T periodo dell' onda. Un suono complesso è la composizione (somma) di più suoni semplici (sinusoidi). Più sono le sinusoidi da sommare, più il suono risultante è complesso da rappresentare. In generale, un' onda acustica periodica si può sviluppare in serie di Fourier:

$$p(\tau) = p_0 + \sum_{i=1}^{\infty} p'_i \cdot \mathrm{sen}\frac{2\pi \cdot i}{T}\tau + \sum_{i=1}^{\infty} p''_i \cdot \cos\frac{2\pi \cdot i}{T}\tau$$

I coefficienti dello sviluppo si calcolano con gli integrali seguenti:

$$p_0 = \frac{2}{T}\int_0^T p(\tau)d\tau \qquad p'_n = \frac{1}{T}\int_0^T p(\tau)\cos\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right)d\tau \qquad p''_n = \frac{1}{T}\int_0^T p(\tau)\mathrm{sen}\left(\frac{2\pi n\tau}{T}\right)d\tau$$

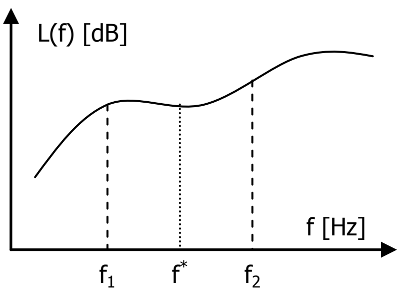




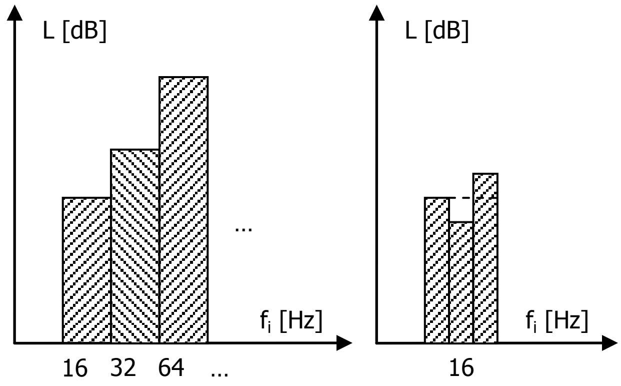
Un segnale generico si può considerare periodico assumendo come periodo l' intervallo di tempo di osservazione. Un segnale puro sinusoidale sviluppato in serie di Fourier ha una sola frequenza caratteristica; uno non periodico ne ha infinite, perché si può scegliere qualsiasi finestra temporale. Il passaggio dal tempo alle frequenze avviene con la trasformata di Fourier. Più è largo l' intervallo di osservazione del segnale, più è fedele la sua ricostruzione. La trasformata si può esprimere in termini di soli coseni:

$$p(\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} p'_n \cdot \cos(n\omega\tau + \delta_n)$$

con $\omega=2\pi f=2\pi/T$. È interessante notare che per ricostruire il suono di partenza è necessario conoscere solo tre parametri: potenza, frequenza e fase. L' orecchio umano è poco sensibile alle variazioni di fase, e quindi sono più importanti potenza e frequenza. Per studiare un suono si può fare un' analisi spettrale, cioè si studia la distribuzione dell' energia (livelli acustici) sulle varie frequenze caratteristiche del suono in esame.



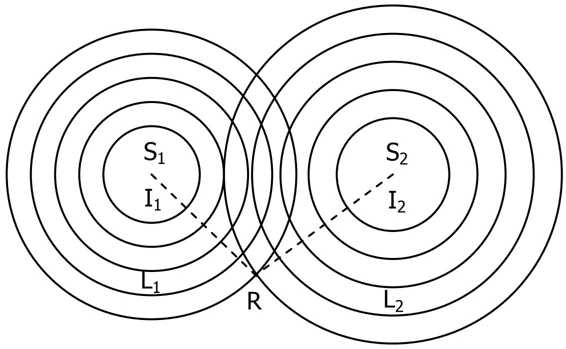
Per non considerare troppi valori numerici di frequenze, si considerano degli intervalli a cui si associa una lunghezza d' onda intermedia e un' intensità acustica corrispondente all' integrale di tutte le energie distribuite tra i valori estremi f_1 e f_2 dell' intervallo. L' analisi spettrale dimostra che quasi tutta la potenza dell' onda acustica di suoni quasi puri è concentrata nella frequenza portante (prima armonica); più ci si allontana, più l' energia acustica diminuisce esponenzialmente. Allora, anche se le armoniche sono infinite, nella pratica si può studiare un' onda acustica limitandosi a poche frequenze centrate intorno a quella portante (fondamentale). Per studiare la distribuzione di potenza di un suono, di solito si usano come intervalli di frequenza: 16 – 32 – 64 – 128 - … fino ad arrivare a 16000 Hz. Ogni intervallo così definito si dice *banda di ottava*. Con questa convenzione, ogni frequenza è doppia della precedente. Il diagramma spettrale del livello acustico di un suono si esegue associando a ogni banda di ottava tutta l' energia compresa nell' intervallo di frequenza relativo alla banda.



Per un' analisi più accurata, si può dividere ogni banda di ottava in tre parti (logaritmiche). In questo caso, si esegue un' analisi in terzi di ottava (figura a destra). Per i terzi di ottava, ogni frequenza è $2^{1/3}$ volte la precedente. La linea tratteggiata rappresenta la banda di ottava intera. Nella pratica, l' analisi acustica spettrale si esegue con i fonometri. Il risultato di un' analisi è come nella figura a sinistra, ma ogni rettangolo è sostituito da un semplice istogramma. Le pressioni e le intensità associate a ogni suono e per ogni frequenza si sommano, i livelli sonori no. Se n è il numero di sorgenti sonore, il livello di intensità in un certo punto è la somma delle singole intensità:

$L_R = 10 \log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}}\right)$ L'esempio seguente chiarisce come si arriva a questa formula.

Esempio



Due onde caratteristiche di due suoni puri escono da due sorgenti puntiformi S_1 e S_2. I livelli sonori associati sono L_1 e L_2. Si vuole calcolare il livello sonoro nel punto ricevente R. In R risulta $I_R = I_1 + I_2$. Dalla formula del livello di intensità sonora (vedi pagina 4), l'intensità acustica di ogni sorgente è:

$$I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}} \qquad I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}}$$

Ricordando che l' intensità sonora si somma, il livello di intensità sonora in R è:

$$L_R = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_R}{I_0} = 10 \cdot \log_{10}\left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}}\right)$$

Da questo risultato si capisce come si può estendere il caso a n sorgenti sonore. Esiste una formula analoga per i livelli acustici misurabili in termini di frequenza. Se un suono contiene n frequenze, e L_i è il livello sonoro associato all' i-esima frequenza, il livello di intensità sonora totale è:

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_i}{10}}\right)$$

Elementi di psicoacustica

L' obiettivo della psicoacustica è studiare come l' intensità acustica proveniente da una sorgente sonora possa essere percepita dall' orecchio umano, o possa provocare danni o fastidi. Il timpano dell' orecchio è un trasduttore di suoni con una risposta in frequenza ben precisa. Per studiare gli effetti di un suono sull' orecchio umano si ricorre alla psicometria. La psicometria è il ramo dell' acustica che studia la percezione e gli effetti del suono sull' uomo. In particolare, bisogna conoscere le caratteristiche principali della sensazione uditiva, o almeno una (l' intensità acustica soggettiva) per potere dare una valutazione quantitativa. Fissata una certa intensità acustica (cioè una certa potenza di sorgente), l' esperienza dimostra che per frequenze medio-alte (500 ÷ 4000 Hz) il segnale acustico arriva al cervello senza attenuazioni, mentre per le frequenze basse succede esattamente il contrario. Pertanto, a parità di intensità sonora, l' effetto del suono sull'orecchio non è costante ma varia con la frequenza. Questo fatto può sembrare una limitazione, ma in realtà è una difesa da parte dell' orecchio. Ad esempio, consideriamo un suono a 20 Hz che si propaga nell' aria (f=20 Hz, c=340 m/s). La lunghezza d' onda è λ=340/20=17 m. I suoni a bassa frequenza producono grandi lunghezze d' onda, e quindi anche maggiori oscillazioni. Le oscillazioni tendono a spostare sensibilmente l' orecchio che, per reazione, tende a irrigidirsi diminuendo così la capacità uditiva. Infatti, è esperienza comune che alle basse frequenze si sente poco. A causa di questa difesa naturale, i suoni bassi devono essere intensificati per essere percepiti. A questo proposito, esistono degli audiogrammi che riportano curve di udibilità. I grafici forniscono la misura del suono in phon [dB], grandezza di riferimento che misura la sensazione uditiva dell'orecchio umano. Le curve iso-phoniche sono caratterizzate da un valore in phon costante. L' orecchio umano non smorza niente tra 500 Hz e 2000 Hz. Infatti, 20 dB di livello di pressione equivalgono a 20 dB di phon. A 16 Hz si deve avere un livello di intensità più elevato (50 dB) per avere la stessa sensazione (20 dB phon). Questo rispecchia il fatto che l' orecchio umano fa più fatica a sentire un suono basso. Una sorgente sonora può costituire "potenzialmente" una sorgente di rumore con effetti sfavorevoli di disturbo o di danno per l' uomo. Nella pratica di misura dei livelli acustici equivalenti si simula il tipo di percezione dell' orecchio umano con un filtro fonometrico. Il filtro attenua le stesse frequenze attenuate dall' orecchio. Il filtro fonometrico più comune è quello in "scala A". Di solito vengono normalizzate tre curve di ponderazione, indicate con A, B e C, in cui si ha un' attenuazione dei livelli sonori in funzione della frequenza.

SCALA "A"	
Hz	dB
50	-30
100	-20
200	-12
500	-3.2
1000	0
2000	+1.2
4000	+1
5000	0
8000	-3

In genere la scala più usata è la A che indicativamente ha i valori riportati in tabella. La scala C non ha attenuazione, e la scala B ha attenuazione intermedia. Si definisce un fattore di attenuazione A_{fi} [dB] che è il livello di intensità di un suono non in base al suo valore nominale, ma in base al livello acustico percepito dall' orecchio umano. Il fattore di attenuazione dipende quindi dalla frequenza. In generale è $A_{fi} < 0$ per ogni frequenza. Solo per frequenze nell' intervallo 2000 ÷ 3000 Hz è $A_{fi} > 0$, come se l'orecchio umano percepisse un livello sonoro leggermente maggiore di quello reale. Il livello di intensità smorzato da un filtro in scala A è dato da:

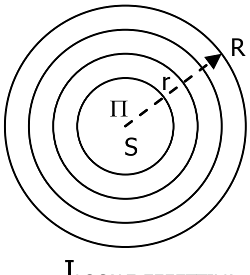
$$\left(L_{fi}\right)_A = L_{fi} + A_{fi}$$

Se n è il numero di frequenze e L_{fi} è il livello sonoro associato all' i-esima frequenza, si può concludere che il livello sonoro attenuato dall' orecchio è:

$$\left(L_{tot}\right)_A = 10 \cdot \log_{10}\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\frac{L_{fi}+A_{fi}}{10}}\right)$$

Di solito $(L_{tot})_A < L_{tot}$ a causa dello smorzamento naturale dell' orecchio alle basse frequenze. L' uomo fa più fatica a farsi sentire rispetto alla donna perché ha un tono di voce centrato sulle frequenze più basse; il pianto dei bambini è tutto centrato tra i 2000 e i 3000 Hz.

Propagazione in campo libero



Una sorgente puntiforme sferica S irradia uniformemente nello spazio circostante una potenza Π. S dista 'r' dal punto ricevente R. L' intensità sonora nel punto R è:

$$I_R = \frac{\Pi}{4\pi r^2}$$

In realtà quasi nessuna sorgente è puntiforme e sferica. Spesso nella pratica le sorgenti non sono sferiche ma direzionali, cioè propagano il suono nello spazio in modo non uniforme convogliandolo in una direzione specifica. Si definisce allora un fattore di amplificazione direzionale Q,

$$Q = \frac{I_{LOCALE\ EFFETTIVA}}{I_R}$$

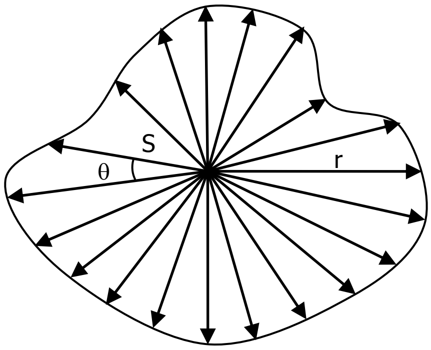
rapporto tra l'intensità sonora locale effettiva e quella teorica che si avrebbe se la sorgente fosse sferica. Nel caso di una sorgente semisferica, si intuisce che il fattore di amplificazione direzionale è 2. Infatti, la superficie di propagazione è metà di una sfera, e l' intensità sonora locale effettiva diventa doppia rispetto al caso sferico. Di conseguenza, Q=2 e si ha:

$$I_R = \frac{\Pi}{4\pi r^2/2}$$

Più si limita il cono (angolo solido) di propagazione dell' onda, più questa si restringe. Allora, a parità di potenza il fattore direzionale Q aumenta. La formula generale per il calcolo dell' intensità sonora in R, dato un fattore di amplificazione Q è:

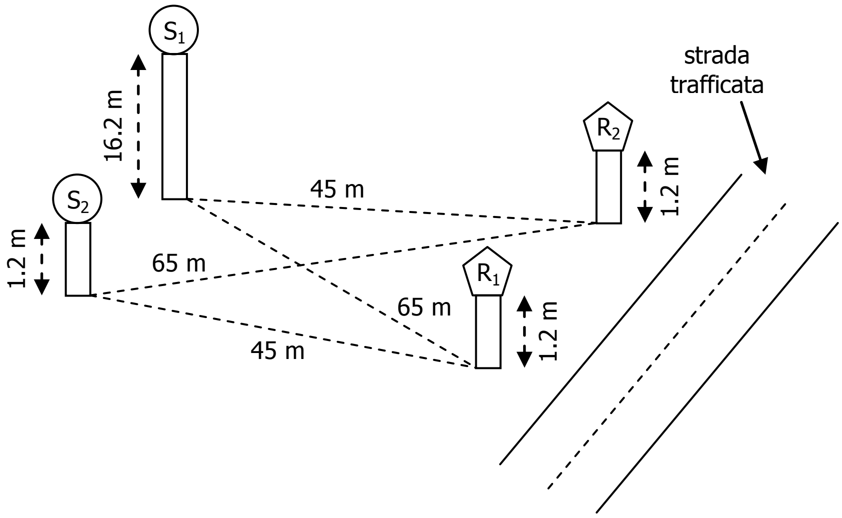
$$I_R = Q \cdot \frac{\Pi}{4\pi r^2}$$

Ogni sorgente acustica potrebbe essere caratterizzata da una mappa di vettori che indicano i vari fattori di amplificazione direzionale. Il fattore di



amplificazione Q è quindi funzione dei due parametri angolari θ e r: $Q=Q(\theta,r)$. La propagazione del suono subisce gli effetti della temperatura e del vento. La temperatura dell' aria diminuisce di circa 1°C ogni 200 m di quota, e cambiano di conseguenza anche le proprietà del mezzo in cui l' onda si propaga (l' onda viene rifratta e deviata verso l' alto). Un fenomeno analogo è dovuto al gradiente di velocità dell' aria vicino al suolo: se la direzione di propagazione dell'onda coincide con quella del vento (propagazione sottovento) l' onda viene deviata verso il basso. Il prossimo esercizio è un esempio di determinazione della potenza emessa da una sorgente in campo libero con effetti dovuti al rumore di fondo.

Esercizio



Due postazioni di misura R_1 e R_2 effettuano due misure (in dB): la prima in presenza di rumore di fondo e senza le due sorgenti S_1 e S_2; la seconda in presenza contemporanea di rumore di fondo ed effetti delle due sorgenti. Dopo la prima misurazione, il livello di intensità misurato in R_1 risulta uguale a quello misurato in R_2 e vale 70 dB. Dopo la seconda misurazione, il livello di intensità è 80 dB in entrambe le postazioni. Se L_1 e L_2 sono i livelli sonori nelle due postazioni, i dati si possono riassumere così:

misura 1: L_1(rumore di fondo)=L_2(rumore di fondo)=70 dB

misura 2: L_1=80 dB, L_2=80 dB

Nell' ipotesi di sorgente semicilindrica (strada), si vogliono valutare le potenze Π_1 e Π_2 delle due sorgenti S_1 e S_2. Nei calcoli, si può assumere che la lunghezza di interferenza della strada sia L=2r=20 m, e che le sorgenti e le postazioni si trovino alle altezze indicate in figura.

Soluzione

Nei livelli di intensità sonora, il primo pedice indica la sorgente di provenienza e il secondo la postazione di rilevamento. Ad esempio, I_{21} indica l' intensità sonora della sorgente S_2 misurata alla postazione R_1. Per il rumore di fondo, indichiamo con I_{f1} e I_{f2} i valori delle intensità sonore misurate nelle rispettive postazioni. Applicando la sovrapposizione delle intensità, si calcola il livello di intensità raggiunto nelle due postazioni:

$$L_1 = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_{11} + I_{21} + I_{f1}}{I_0} \qquad L_2 = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_{12} + I_{22} + I_{f2}}{I_0}$$

Per le singole intensità, si può scrivere ad esempio:

$$I_{11} = \frac{\Pi_1}{4\pi r_{11}^2}$$

La sorgente S_1 si può considerare sferica perché è più in alto delle postazioni riceventi. Le due distanze r_{11} e r_{12} si possono calcolare dai dati in figura:

$$r_{11}^2 = (16.2 - 1.2)^2 + 65^2 = 4450 \qquad r_{12}^2 = 15^2 + 45^2 = 2250$$

Per le intensità I_{21} e I_{22} la sorgente S_2 va considerata semisferica perché è alla stessa quota delle postazioni:

$$I_{21} = \frac{\Pi_2}{2\pi r_{21}^2} \qquad I_{22} = \frac{\Pi_2}{2\pi r_{22}^2} \qquad r_{21} = 45\,\mathrm{m} \qquad r_{22} = 65\,\mathrm{m}$$

Il rumore di fondo misurato dalle postazioni è prodotto dalla strada che viene considerata una sorgente semicilindrica, ed è uguale per le due postazioni (I_f=I_{f1}=I_{f2}):

$$I_f = \frac{\Pi_f}{\pi r L} \Rightarrow L_{1f} = L_{2f} = L_f = 10 \log_{10} \frac{I_f}{I_0}$$

I dati disponibili sono: L_{f1}=L_{f2}=70 dB, L_1=80 dB e L_2=80 dB. Si può impostare il sistema risolutore seguente:

$$\begin{cases} 10^{\frac{L_1}{10}} \cdot 10^{-12} = I_{11} + I_{21} + I_f \\ 10^{\frac{L_2}{10}} \cdot 10^{-12} = I_{12} + I_{22} + I_f \\ 10^{\frac{L_f}{10}} \cdot 10^{-12} = I_f \end{cases}$$

Dall' ultima equazione si può ricavare subito I_f=10^{-5}, e quindi Π_f=$\pi r L I_f$=0.00628 W. In modo analogo, si possono sostituire le altre intensità con le rispettive potenze, ottenendo un sistema nelle due incognite Π_1 e Π_2. Per leggibilità, usiamo i coefficienti approssimati:

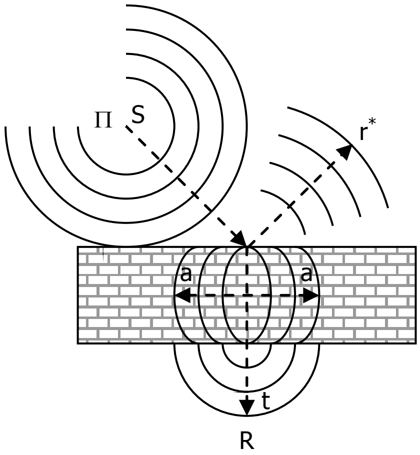
$$I_{11} = \frac{\Pi_1}{55920} \qquad I_{21} = \frac{\Pi_2}{12723} \qquad I_{12} = \frac{\Pi_1}{28274} \qquad I_{22} = \frac{\Pi_2}{26546}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\Pi_1}{55920} + \dfrac{\Pi_2}{12723} = 9 \cdot 10^{-5} \\ \dfrac{\Pi_1}{28274} + \dfrac{\Pi_2}{26546} = 9 \cdot 10^{-5} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 12723\Pi_1 + 55920\Pi_2 = 64033 \\ 26546\Pi_1 + 28274\Pi_2 = 67550 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Pi_1 = 1.749\,\mathrm{W} \\ \Pi_2 = 0.747\,\mathrm{W} \end{cases}$$

Può succedere che l' intensità I a cui è associato un livello sonoro L sia eccessiva. Si può rimediare con una schermatura, cioè con un solido interposto tra sorgente e ricevente. Si parla in questo caso di barriere acustiche.

Fonoisolamento e fonoassorbimento

Esistono diversi accorgimenti per ridurre la rumorosità in un ambiente da proteggere, in base alle effettive possibilità di intervento sulle sorgenti, alla loro disposizione rispetto all'ambiente disturbato e alle modalità di propagazione. I provvedimenti più efficaci e razionali sono quelli che riducono la potenza acustica irradiata dalle sorgenti, anche se a volte è impossibile. Si cercano allora altre soluzioni tendenti a ostacolare la propagazione del rumore dalle sorgenti all' ambiente da proteggere (fonoisolamento) e/o tendenti a limitare gli effetti della riverberazione (fonoassorbimento). La sorgente del rumore può essere in un ambiente diverso da quello da proteggere. Se tra i due c' è un divisorio (parete, solaio) che ostacola la propagazione delle onde sonore, conviene agire proprio sul divisorio per attenuare il livello del rumore nell' ambiente disturbato. L' isolamento acustico (o fonoisolamento) si realizza solo in casi eccezionali dove si riesce a ridurre il rumore in modo così significativo da potere parlare di isolamento in senso stretto. Nella pratica ci si accontenta di ridurre il livello per portare il disturbo entro i limiti ritenuti accettabili nella situazione considerata. Pertanto, è più corretto parlare di attenuazione. Comunque, la tecnica del fonoisolamento si può usare nel caso di sorgenti di rumore situate nello stesso ambiente da proteggere; deve essere possibile circoscrivere le sorgenti con appositi pannelli fonoisolanti che le separino dal resto dell' ambiente. In una sala con un tempo di riverberazione elevato, la zona soggetta a riverbero prevale su quella diretta di emissione della sorgente, già a piccole distanze da quest' ultima. Allora, per ridurre il livello sonoro in una sala con una o più sorgenti di rumore bisogna intervenire con dei pannelli di materiale fonoassorbente (fonoassorbimento). Anche in questo caso, come per il fonoisolamento, i materiali esistenti riducono il riverbero in misura modesta. Comunque, il trattamento fonoassorbente di una sala può contribuire notevolmente all' insonorizzazione di un ambiente di lavoro, dove di solito esistono più sorgenti di rumore. Il "passaggio" di un' onda acustica in un materiale è simile a quello di una radiazione termica.



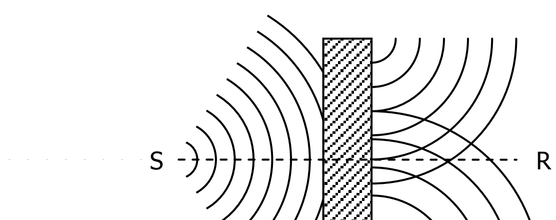
Come nel caso dell' irraggiamento, si hanno tre indici:

- a = coefficiente di assorbimento acustico (assorbitività) del corpo
- t = coefficiente di trasmissione acustica (trasmissività) del corpo
- r^* = coefficiente di riflessione acustica (riflettività) del corpo

$$a = \frac{\Pi_{assorbita}}{\Pi_{incidente}} \qquad t = \frac{\Pi_{trasmessa}}{\Pi_{incidente}} \qquad r^* = \frac{\Pi_{riflessa}}{\Pi_{incidente}}$$

I tre indici sono legati dalla relazione: $a+t+r^*=1$. Una parete in muratura o in cemento intonacato ha un coefficiente di assorbimento praticamente nullo. La lana di vetro lavorata, invece, ha un coefficiente di assorbimento tra i più alti (0.80).

Barriere acustiche

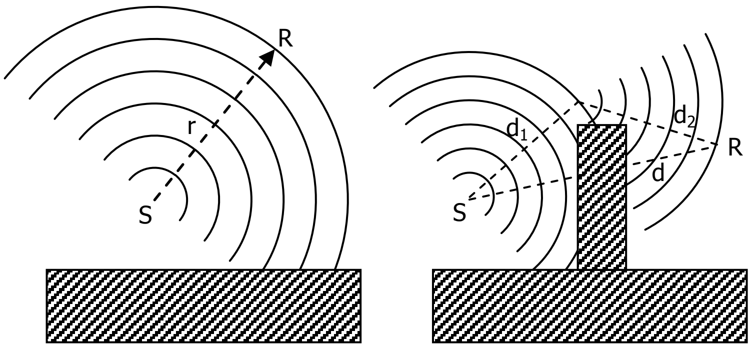


Il rumore prodotto da una sorgente acustica e i provvedimenti per eliminarlo o almeno ridurlo sono alcuni degli aspetti importanti per chi studia il suono. L' uso di barriere acustiche è un modo per limitare i danni (o i fastidi) prodotti da sorgenti sonore sull' uomo. In figura è rappresentato un modello schematico di una barriera che separa una sorgente S da un ricevente R. La quantità di energia che arriva a R dipende dalla geometria e dalla distanza tra R e la schermatura (o barriera). Nella pratica è impossibile realizzare una barriera acustica perfetta, cioè che isoli totalmente R dall' onda acustica. Infatti, una barriera acustica a trasmissione nulla dovrebbe riflettere o assorbire completamente tutta la potenza acustica (cioè non fare passare niente). In realtà, c' è la possibilità che il suono passi dall' altra parte raggiungendo il ricevente. I problemi operativi principali sono di tipo geometrico: la dimensione della barriera, per quanto grande, è sempre limitata nello spazio ed è estremamente difficile riflettere tutte le onde dirette dalla sorgente al ricevente. Un altro problema è la diffrazione: la barriera non riesce a schermare tutte le onde provenienti dalla sorgente, e alcune la oltrepassano andando a investire il ricevente. Questo comportamento si verifica quando l' altezza della barriera è confrontabile con la lunghezza d' onda dell' onda sonora. Se l' altezza della barriera è molto maggiore della lunghezza d' onda, si crea una "zona d' ombra" in prossimità della barriera (ovviamente dalla parte del ricevente). Dato che l' effetto della barriera acustica è attenuare il livello sonoro di una sorgente, la sua efficacia si misura dalla differenza di intensità sonora prima e dopo la sua introduzione. Si definisce quindi attenuazione A [dB] la differenza tra il livello acustico misurato al ricevente senza barriera e quello misurato con barriera:

$$A_{barriera} = L_R - (L_R)_{barriera}$$

Lo studio del fattore di attenuazione dipende da elementi geometrici caratteristici della barriera e dalle lunghezze d' onda caratteristiche dell' onda acustica. La relazione tra questi due elementi è descritta quantitativamente dal seguente numero di Fresnel N.

Numero di Fresnel



Una sorgente S dista r da un punto ricevente R (figura a sinistra). Il livello di intensità sonora al ricevente è:

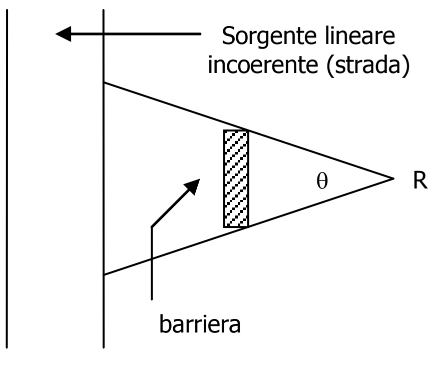
$$L_R = 10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

Se L_R è eccessivo, si usa una barriera acustica. La attenuazione in dB della barriera dipende dalla sua geometria e dalla lunghezza d'onda λ_i (figura a destra). Il parametro adimensionale N, detto numero di Fresnel, è definito come:

$$N = \frac{2}{\lambda_i}(d_1 + d_2 - d)$$

I parametri hanno il significato seguente: d_1 è la distanza tra sorgente e barriera; d_2 è la distanza tra ricevente e barriera; d è la distanza tra sorgente e ricevente; λ_i è la lunghezza d' onda della i-esima frequenza considerata. Il numero di Fresnel è molto utile nel calcolo dell'attenuazione di una barriera. Infatti, esistono formule matematiche funzioni di N che forniscono esplicitamente il valore di attenuazione. Quando le formule non sono applicabili si ricorre a tabelle, sempre dipendenti da N. Il calcolo dell' attenuazione va effettuato singolarmente per ogni frequenza, perché il numero di Fresnel dipende dalle frequenze:

$$N = \frac{2}{\lambda_i}(d_1 + d_2 - d) = \frac{2}{\frac{c}{f_i}}(d_1 + d_2 - d) = \frac{2(d_1 + d_2 - d)}{c} \cdot f_i$$



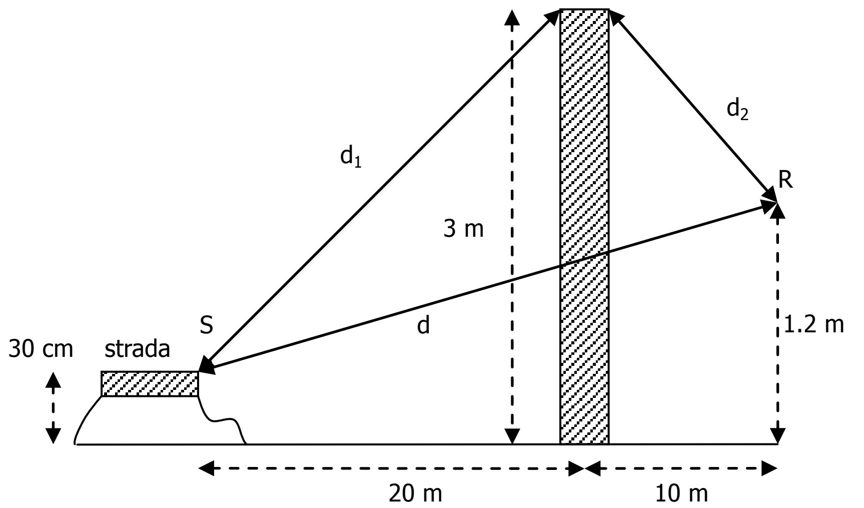
Per calcolare l' attenuazione di una barriera acustica di lunghezza finita si può fare un' approssimazione brutale nel caso di una sorgente lineare incoerente (autostrada). L' angolo θ è l' angolo intercettato nel ricevente R dalla proiezione della barriera acustica sullo sviluppo della sorgente lineare. Se la barriera avesse una lunghezza infinita, sarebbe θ=180°. Linearizzando si ottiene:

$$A_\theta = A_{180^\circ} \cdot \frac{\theta}{180^\circ}$$

Esercizio

Un osservatore è a 30 metri da una sorgente sonora S costituita da una strada. Sorgente e osservatore sono separati da una lunga barriera verticale artificiale alta 3 metri e disposta perpendicolarmente alla linea ideale che li congiunge. La sorgente si trova a 30 centimetri da terra, il ricevente a 1.2 metri. L' osservatore è a 10 metri dalla barriera. Si vuole determinare il livello di pressione sonora nel punto di osservazione (ricevente R), noto il livello in bande di ottava in assenza della barriera riportato nella tabella seguente.

f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
L_p [dB]	76	65	59	57	53	47



$d_1+d_2-d=0.33$ [m]. Per la velocità di propagazione del suono usiamo il valore c=344 [m/s]. Ora possiamo calcolare il numero di Fresnel in funzione della frequenza.

$$N=\frac{2f}{c}\left(d_1+d_2-d\right)=\frac{2\cdot 0.33}{344}f=1.92\cdot 10^{-3}f$$

La sorgente è lineare (strada). In questi casi per calcolare l' attenuazione si può usare la formula seguente dipendente dal numero di Fresnel: A=10 LogN+8. Bisogna ripetere lo stesso calcolo per ogni frequenza della tabella precedente. Il livello sonoro totale è l' integrazione logaritmica dei livelli sonori delle singole frequenze (vedi Esempio a pagina 6). Se nei calcoli si considera la scala A, si ottiene la tabella riassuntiva seguente:

f	125	250	500	1000	2000	4000
L	76	65	59	57	53	47
N	0.24	0.48	0.96	1.92	3.84	7.67
A	1.8	4.81	7.82	10.83	13.84	16.85
L-A	74.2	60.19	51.19	46.17	39.16	30.15
Peso scala A	-16.1	-8.6	-3.2	0	1.2	1
L_A	58.1	51.59	47.98	46.17	40.36	31.15
10^(L/10)	645654.2	144211.5	62805.84	41399.97	10864.26	1303.16

Per avere il livello di intensità sonora al ricevente basta sommare i numeri dell' ultima riga, fare il logaritmo in base 10 e moltiplicare per 10. Si ottiene L_{tot}=59.57243 [dB] in scala A.

Acustica degli ambienti confinati

Lo studio dell' acustica in ambienti confinati riguarda ambienti particolari come teatri, sale da spettacolo, auditori, ma esistono eccezioni. In una sala con una sorgente sonora S di potenza nota e un ricevente R si può calcolare il livello sonoro in R (vedi Livelli acustici a pagina 3). Ora il problema è dimensionare la stanza in modo che il suono si propaghi nel modo migliore possibile da S a R. Oltre alle onde dirette, in R arrivano anche onde riflesse dalle pareti. Le onde riflesse, assenti in campo aperto, colpiscono le pareti apportando un contributo di energia acustica maggiore rispetto al campo aperto. Se la riflessione è speculare si possono avere complicazioni. Assumiamo che la riflessione sia diffusa, cioè l'onda acustica che investe la superficie viene diffusa uniformemente in tutto lo spazio circostante e in tutte le direzioni. In un campo sonoro perfettamente diffuso non esistono quindi direzioni privilegiate di propagazione del suono. Un parametro fondamentale nel dimensionamento dell' acustica delle sale è il coefficiente di assorbimento delle superfici della stanza. È più facile pensare all' assorbimento come somma di trasmissione e assorbimento (tutto ciò che non è né trasmesso né assorbito viene riflesso). Consideriamo la relazione tra i coefficienti a, t e r^* (vedi Fonoisolamento e fonoassorbimento a pagina 9). Raggruppando i coefficienti di trasmissività e di assorbitività in un termine unico α definito come coefficiente di assorbimento totale si ottiene:

$$\alpha = a + t \quad \Rightarrow \quad \alpha + r^* = 1$$

Se il ricevente fosse raggiunto nella stanza dalla sola onda diretta, il coefficiente di assorbimento varrebbe 1, ma in realtà non è così. Nell' analisi acustica in campo confinato non bisogna considerare solo la trasmissione di un ambiente chiuso in funzione delle pareti, ma anche l' assorbimento dovuto agli oggetti presenti nell' ambiente (tavoli, sedie, persone, ecc.). L' assorbimento totale in un volume qualsiasi è descritto dal parametro R [m^2]:

$$R = \frac{\alpha S}{1-\alpha} \qquad \alpha = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{\sum_i S_i}$$

S è la superficie totale degli oggetti nell' ambiente (pareti, cose presenti, ecc.), α è il coefficiente medio di assorbimento della stanza, S_i è la superficie i-esima. Le camere anecoiche, dove non si riesce a parlare nemmeno a bassa voce, hanno α molto elevati, e quindi anche R elevati. Se ci sono finestre, α vale 1 e R tende a infinito. Se una sorgente S ha potenza Π, si può dimostrare che un ricevente R riceve un' intensità sonora:

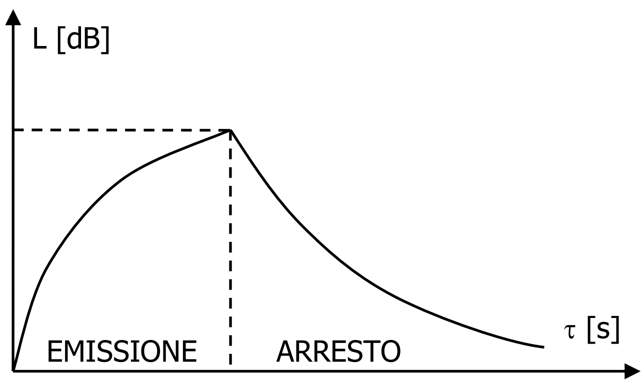
$$I = 10\log_{10}\frac{\dfrac{\Pi Q}{4\pi r^2} + \dfrac{4\Pi}{R}}{I_0}$$

dove Q è il fattore direzionale. A numeratore, il primo termine è l' intensità sonora dovuta a S nella direzione di R, il secondo è il contributo delle onde riflesse, legato alle dimensioni dell'ambiente e al fattore di assorbimento. Bisogna distinguere due aspetti principali:

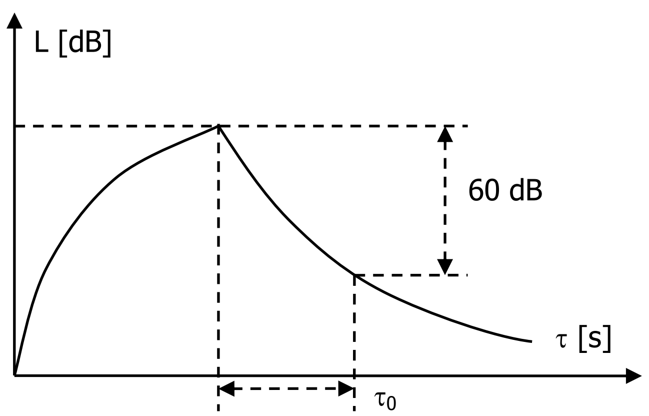
<u>fase di progetto</u> – nota la geometria della stanza, si possono cercare Π, Q e R in modo da ottenere il livello di intensità sonora L voluto.

<u>fase di verifica</u> – misurando L, e valutando Q e R dalle caratteristiche della stanza, si può calcolare la potenza Π della sorgente.

Tempo di riverberazione



Nei locali chiusi, se una sorgente emette un suono e poi tace, il suono decade nel tempo in base ai materiali della stanza. La percezione sonora è la possibilità di ricevere un suono dopo un certo tempo. Per l' orecchio umano, il tempo è circa 1/15 s. Quello che arriva prima di questo tempo viene mediato e percepito come un suono unico. Consideriamo come sorgente una persona che parla. Durante il tempo di emissione, il livello di intensità sonora cresce fino a un massimo che tiene conto di tutte le riflessioni. L' aumento di intensità fino alle condizioni di regime (le pareti assorbono una potenza uguale a quella della sorgente) è sempre molto rapido. Con pareti perfettamente riflettenti, l' intensità aumenta sempre (a parte l'assorbimento dell'aria). Pertanto, minore è l' assorbimento delle pareti, maggiore è il livello a regime. Vicino alla sorgente, prevale la componente diretta; lontano, prevalgono le riflessioni. All' arresto del suono, l'intensità scende esponenzialmente (le onde riflesse



continuano ad arrivare). Si definisce <u>tempo di riverberazione</u> τ_0 il tempo che deve passare perché in un punto l' intensità sonora si riduca a un milionesimo di quella iniziale (cioè abbia una caduta di 60 dB). Bisogna studiare un giusto equilibrio tra poca riverberazione (suoni ovattati, difficoltà di percezione) e troppa riverberazione (stanze vuote, rimbombo). La riverberazione dipende dai materiali e da tutti gli oggetti presenti. Materiali troppo assorbenti ostacolano le riflessioni (ambiente afono). Tempi di arresto lunghi ostacolano la comprensione del suono. In stanze poco assorbenti, il tempo di arresto può arrivare ad alcuni secondi, e l' orecchio percepisce facilmente il suono. Però, una riverberazione eccessiva confonde i suoni attuali con le riflessioni dei precedenti (acustica scadente). Questo inconveniente si manifesta con tempi di arresto di almeno un secondo. Se inizialmente l' energia incidente di un' onda generica è w, dopo una riflessione diminuirà di un fattore α, e l' energia rimasta sarà $(1-\alpha)w$. Se nel tempo τ_0 l'onda viene riflessa n volte, l' energia residua è $w_{totale}=(1-\alpha)^n w=10^{-6}w$ (dalla definizione di τ_0). Se ΔT è il tempo tra due riflessioni, si può scrivere:

$$n=\frac{\tau_0}{\Delta T} \Rightarrow (1-\alpha)^{\tau_0/\Delta T}=10^{-6} \Rightarrow \tau_0=-13.8\frac{\Delta T}{\ln(1-\alpha)}$$

Siano V il volume, S la superficie della stanza, e c la velocità del suono. Si dimostra che:

$$\Delta T=\frac{4V}{cS}$$

Se il mezzo è l' aria, sviluppando il logaritmo in serie di Taylor si ottiene la formula approssimata di Sabine:

$$\tau_0=0.16\frac{V}{\alpha S}$$

Se la propagazione del suono è quasi uniforme, la stanza ha un solo tempo di riverberazione. Gli ambienti dovrebbero avere forma regolare, la sorgente non deve essere periferica, e le pareti dovrebbero avere tutte lo stesso assorbimento. In queste ipotesi, α è costante e si può calcolare il tempo di riverberazione dalla formula approssimata, valutando quindi se è accettabile. Per diminuirlo, si può aumentare α, ma così aumenta anche la costante di ambiente R e il livello di intensità sonora al ricevente diminuisce. Si può rimediare aumentando la potenza Π della sorgente (ad esempio, con un amplificatore).