- <u>Introduzione</u>
- Teoria acustica
  - Equazioni di moto
  - Soluzioni
    - Onda piana
      - Frequenza, lunghezza d'onda
    - Onda sferica
  - Grandezze fondamentali:
    - Pressione, intensità e potenza sonora
- <u>Metodi di misura e strumentazione</u>
  - dB, livelli
  - bande di frequenza
  - curve isofoniche

Docente: Maurizio DE LUCIA
(*delucia@unifi.it*)

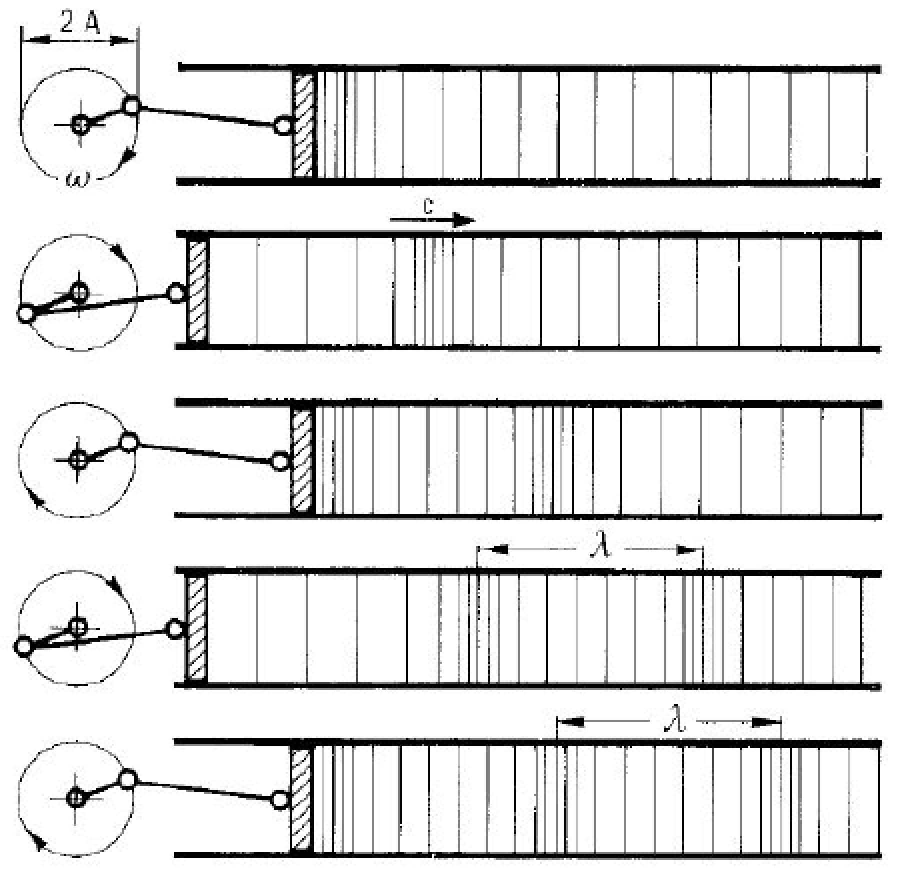
Introduzione

- **Suono:** fenomeno ondulatorio per mezzo del quale l'energia meccanica di vibrazione viene propagata attraverso un mezzo elastico
- Si realizza attraverso la propagazione di una perturbazione di carattere oscillatorio nelle grandezze fisiche del mezzo elastico
  - In particolare l'orecchio umano rileva le perturbazioni di **pressione** dell'aria (mezzo elastico), dando origine alla **sensazione uditiva**
- Nel caso del suono si hanno <u>onde longitudinali</u>: lo spostamento delle "particelle" del mezzo si realizzano nella stessa direzione lungo la quale avviene la propagazione del disturbo
- Le grandezze coinvolte nello studio dei fenomeni acustici sono le perturbazioni non stazionarie delle grandezze fisiche che descrivono lo stato e il campo di moto delle particelle (pressione, densità, velocità...) che risultano molto piccole rispetto ai valori medi stazionari
  - Range Udibile per orecchio umano: **da 20 μPa – 200 Pa** (pressione atmosferica: **10^5Pa**)

Introduzione

Esempio di realizzazione di un'onda:

- Le particelle sottoposte alla forza dovuta al moto del pistone vengono compresse e rarefatte periodicamente.
- La forza ELASTICA tende a ripristinare la loro posizione alla posizione di equilibrio
- La forza di INERZIA tende a prolungare la corsa della massa in movimento verso la posizione di equilibrio



Acustica – cenni di teoria

Si considerano le generiche variabili termofluidodinamiche, i valori istantanei possono essere espressi come la somma dei valori stazionari e quelli propriamente non stazionari

Fluido perfettamente elastico, omogeneo e isotropo e si trascurano gli effetti viscosi e di conduzione termica

$$\varphi = \overline{\varphi} + \varphi'(\vec{x},t)$$

$$\frac{\varphi'(\vec{x},t)}{\left\langle \overline{\varphi} \right\rangle} << 1$$

$$\varphi = p, \rho, u, \ldots$$

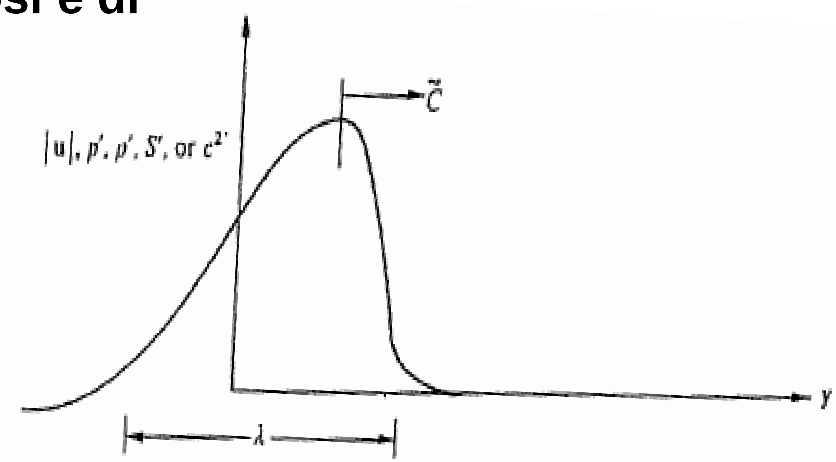


Fig. 1.1 Propagating disturbance.

$$s = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \quad \text{condensazione}$$

$$p_0, \rho_0 = \text{cost.}$$
$$U_0 = 0$$

Acustica – cenni di Teoria

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

equazione di continuità

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u}\right) = -\nabla p$$

equazione della quantità di moto

$\vec{f}$: forza di volume esterna
ρ : densità
$\vec{u}$: velocità del fluido

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x_1}\vec{i}_1 + \frac{\partial}{\partial x_2}\vec{i}_2 + \frac{\partial}{\partial x_3}\vec{i}_3$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \vec{u} = 0$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p'$$

Equazioni di moto **LINEARIZZATE**

$$p = \rho R T$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma}$$

equazione di stato per un gas perfetto

$$B = \rho_0 \left[\frac{\partial p}{\partial \rho}\right]_{\rho_0, s=cost}$$

$$p = Bs$$

Bulk-Adiabatic-Modulus

Acustica – cenni di Teoria

- Combinando le equazioni precedenti si ottiene l'**equazione delle onde omogenea** che descrive la propagazione dei disturbi di pressione in un gas perfetto in quiete e privo di sorgenti
- **C** è la **velocità del suono**, è la velocità con la quale si propagano le perturbazioni di pressione all'interno del mezzo fluido in quiete
- Nell'approssimazione di gas perfetto c dipende solo dalla temperatura
- L'equazione di stato per un gas perfetto assume una forma particolarmente semplificata
- **Per T=0°C, c=331,6m/s**

$$\boxed{\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \nabla^2 p'}$$

$$\boxed{c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{\frac{B}{\rho}}}$$

$$\boxed{c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{\gamma R T}}$$

$$\boxed{p' = c^2 \rho'}$$

Acustica – cenni di Teoria

- Soluzione dell'equazione delle onde monodimensionale mostra che la fluttazione di pressione si comporta come la somma di due "onde" che si propagano a velocità c
- In generale si considera una funzione armonica del tempo e la notazione mediante numeri complessi, il segnale è dato dalla parte reale della variabile complessa
- Nella teoria **1-D** la soluzione è un'**onda piana**, ovvero le variabili termodinamiche assumono valori costanti su piani perpendicolari alla direzione di propagazione
- **k**: numero d'onda

$$k = \frac{\omega}{\bar{c}}$$

Esempio:

$$p' = cos(kx - \omega t)$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2}$$

$$p' = f(x - ct) + g(x + ct)$$

$$p' = Re\left[\hat{p} e^{j\omega t}\right] = Re(\hat{p}')$$

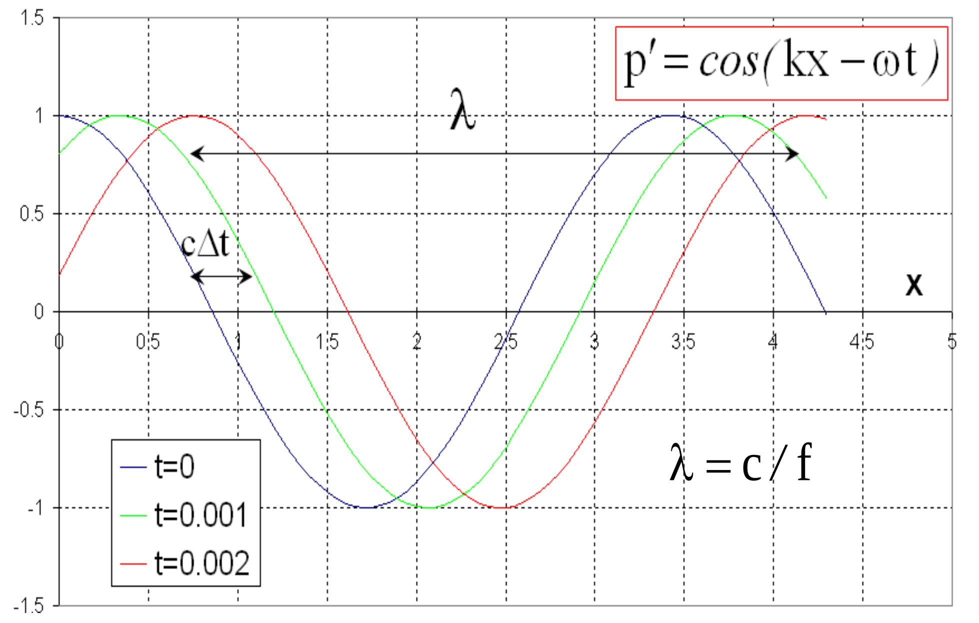
$$\boxed{\hat{p} = \hat{A} e^{-jkx} + \hat{B} e^{jkx}}$$

$$\boxed{u = \frac{\hat{A}}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} - \frac{\hat{B}}{\rho c} e^{j(\omega t + kx)}}$$

Acustica – cenni di Teoria

- **f**: frequenza, numero di cicli completi di oscillazione che la pressione compie nell'unità di tempo [Hz]
- Lunghezza d'onda λ :distanza in metri tra due punti corrispondenti (stesso valore e stessa pendenza) di due oscillazioni consecutive **[m]**
- Ampiezza: valore di picco del ciclo della pressione **[Pa]**

f=100Hz, T=20°C



Acustica – cenni di Teoria

$$\boxed{\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=\frac{\partial^2 p}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial p}{\partial r}}$$

Soluzione equazione delle onde in coordinate sferiche

$$\boxed{p'=\frac{1}{r}f_{\pm}\left(t\mp\frac{r}{c}\right)} \Rightarrow \boxed{\begin{aligned} p'&=\frac{\hat{A}}{r}e^{j(\omega t-kr)}\\ u&=\left(1-\frac{j}{kr}\right)\frac{p'}{\rho c}\end{aligned}}$$

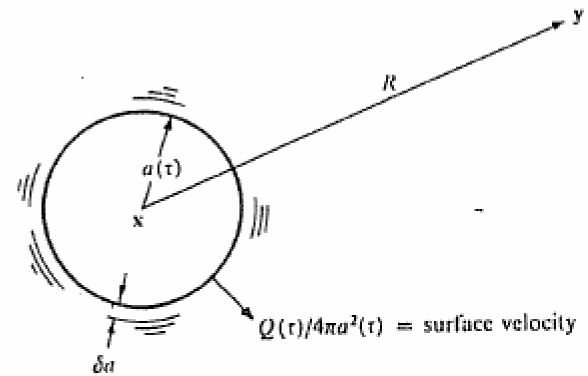


Fig. 1.12 Pulsating sphere.

$$a(t) << Tc_0 \equiv \lambda$$

$$\frac{a'(t)}{a(t)} << 1$$

ES: "small" Pulsating-Sphere

$$u\big|_a = Q(t)/4\pi a(t)^2 \text{ sulla sfera}$$

$$\boxed{\rho_0\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}=-\nabla p}$$

$$\Rightarrow \quad p'=\frac{\rho_0}{4\pi r}\frac{\partial}{\partial t}Q\left(t-\frac{r}{c_0}\right)$$

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

- Valore RMS della pressione acustica, T è il periodo di oscillazione se p è periodica nel tempo

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

- Il valore è strettamente connesso al contenuto energetico del suono
- La densità di energia ISTANTANEA, cioè energia per unità di volume è data dalla somma di due termini:
  - l'energia cinetica
  - l'energia potenziale

$$E = \frac{p'^2}{2\rho_0 c_0^2} + \frac{\rho_0 v'^2}{2},$$

- Per onde piane monofrequenza progressive e per onde sferiche in campo libero (molto lontano dalla sorgente kR>>1), le relazioni si semplificano

$$p' = \rho_0 cu \Rightarrow \frac{1}{T}\int E dt = \frac{p'^2_{RMS}}{\rho c^2}$$

Valida per onde monofrequenza, piane o sferiche a grande distanza dalla sorgente

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

- **POTENZA SONORA, Pw** o **W:** grandezza scalare che indica la quantità di energia emessa da una sorgente nell'unità di tempo **[W]**
- **INTENSITA', I:** è una grandezza vettoriale, esprime il flusso di energia acustica che attraversa la superficie nell'unità di tempo unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione, , mediato nel tempo **[W/m²]**
- Pressione, Potenza e Intensità acustica possono variare in un range estremamente ampio di valori

$$\boxed{\vec{I} = \frac{1}{T}\int_0^T p'\,\vec{u}'\,dt}$$

$$\left|\vec{I}\right| = \frac{{p'}^2_{RMS}}{\rho_0 c_0}$$

Per onda piana o onda sferica lontana dalla sorgente

•lieve sussurro	10^{-9} (W)
•auto su autostrada	10^{-2} (W)
•martello pneumatico	10^{1} (W)
•aereo turbojet con postbruciatori in funzione	10^{5} (W)

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

- Risulta conveniente usare le grandezze in decibel
- Tramite il decibel si definiscono i LIVELLI delle grandezze fondamentali

$$dB = 10 * log_{10} (G / G_{ref})$$

$$\boxed{SPL = 10 * log_{10}\left(\frac{p'^{2}_{RMS}}{p^{2}_{REF}}\right)}$$

Sound Pressure Level, Pref=20 μPa

$$\boxed{IL = 10 * log_{10}\left(\frac{I}{I_{REF}}\right)}$$

Intensity Level, Iref=10^{-12} W/m^2

$$\boxed{L_W = 10 * log_{10}\left(\frac{W}{W_{REF}}\right)}$$

Livello di potenza sonora, Wref=10^{-12} W

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

Come si sommano i livelli sonori ?

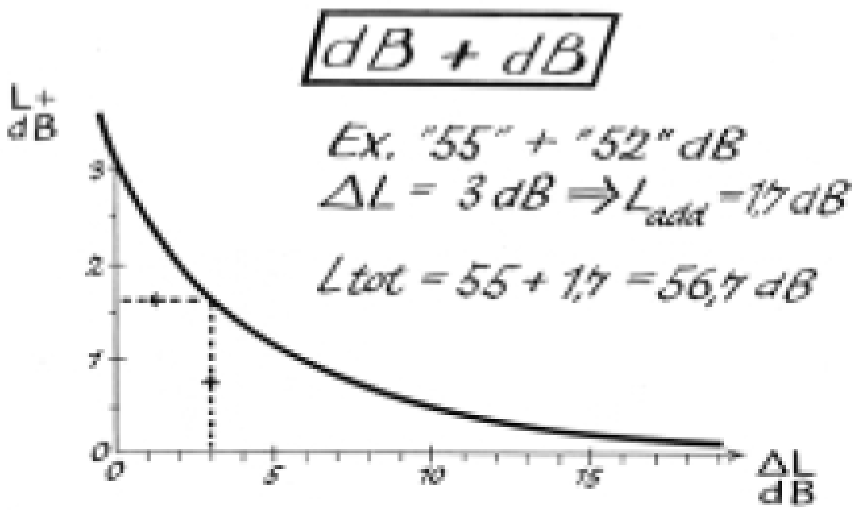
I livelli di due sorgenti di rumore si sommano in campo lineare !!!

ESEMPIO: si debba sommare un livello di POTENZA sonora di 55 dB con uno di 52 dB.

(Si ricordi che se $\log a = c$ allora è $a = 10^c$)

passaggio in lineare : $10^{55/10} = 316230.$ $\qquad 10^{52/10} = 158490.$

passaggio in dB :10 Log(316230.+158490.) = ***56.7***



Il grafico a fianco fornisce un metodo di calcolo rapido basato su una curva di incremento del livello più elevato in funzione della differenza di livello delle due sorgenti.

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

ESERCIZIO:

Supponiamo che in un punto a causa di una sorgente di rumore si è rilevato un livello di POTENZA sonora di 67 dB.

Quale è il livello se si attiva una ulteriore sorgente di rumore uguale alla precedente e pressappoco nello stesso punto?

RISPOSTA: *la potenza sonora raddoppia pertanto per cui, detto A il valore della potenza sonora originale, abbiamo:*

$$10 \text{ Log } (2 \text{ Pot}) = 10 \text{ Log } (\text{Pot}) + 10 \text{ Log } (2) = 10 \text{ Log } (\text{Pot}) + 3$$

per ogni raddoppio in scala lineare della POTENZA sonora del rumore emesso dalla sorgente, il livello in dB aumenta di 3 !

Se il rumore quadruplica il livello si incrementa di 6 dB, se diventa 8 volte superiore il livello si incrementa di 9 dB e così via…..seguendo le potenze di 2.

Se invece si fosse trattato di PRESSIONE sonora, con i precedenti valori in decibel si avrebbe:

$$20 \text{ Log } (2 \text{ Pre}) = 20 \text{ Log } (\text{Pre}) + 20 \text{ Log } (2) = 20 \text{ Log } (\text{Pre}) + 6$$

per ogni raddoppio in scala lineare della PRESSIONE sonora del rumore emesso dalla sorgente, il livello in dB aumenta di 6 !

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

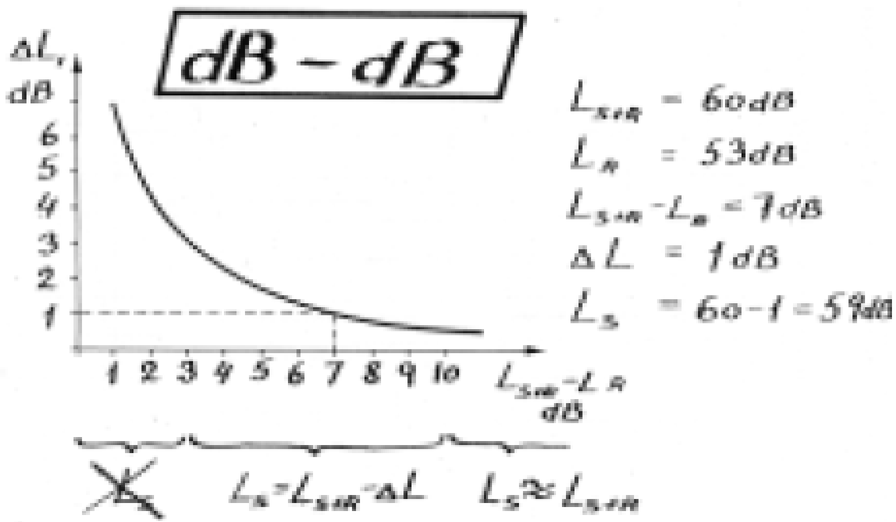
Come si sottraggono i livelli sonori ?

I livelli di due sorgenti di rumore si sottraggono in campo lineare !!!

ESEMPIO: si debba sottrarre un livello di POTENZA SONORA di 53 dB da uno di 60 dB.

passaggio in lineare : $10^{60/10} = 1000000$ $\quad 10^{53/10} = 199526$

passaggio in dB :10 Log(1000000-199526) = ***59.03***



Il grafico a fianco fornisce un metodo di calcolo rapido basato su una curva di decremento del livello più elevato in funzione della differenza di livello delle due sorgenti.

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

Propagazione del rumore nel fluido

Occorre distinguere due casi:

Ambiente libero:

il suono non incontra ostacoli nel suo percorso, come ad esempio all'aperto in assenza di barriere e trascurando le riflessioni al suolo.

A livello sperimentale può essere realizzato tramite una camera con pareti perfettamente assorbenti ***(camera anecoica)***

Ambiente riverberante:

il suono viene perfettamente riflesso dalle pareti, creando all'interno dell'ambiente un campo diffuso, così detto perché non si riesce a distinguere un punto origine delle perturbazioni acustiche.

A livello sperimentale può essere realizzato tramite una camera con pareti perfettamente riverberanti ***(camera riverberante)***

Ovviamente le due situazioni rappresentano condizioni ideali . Nella realtà non ci troveremo mai esattamente nelle due ipotesi soprastanti. Si fa riferimento ad esse perché semplificano notevolmente lo studio dei problemi di acustica pratica.

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

Campo libero:livello di pressione sonora prodotto da una sorgente puntiforme

Assenza assoluta di ostacoli

In tale caso, del tutto ipotetico, una sorgente puntiforme collocata nel punto P genera un campo di onde sonore sferiche che si propagano con la stessa velocità in tutte le direzioni uscenti da P (divergenza). In tali condizioni si dimostra facilmente che il legame tra il livello di potenza sonora (dato caratteristico della sorgente) ed il livello di pressione sonora in un punto distante r da P è il seguente:

$$L_p = L_W - 10\mathrm{Log}(4\pi r^2) = L_W - 2\cdot 10\mathrm{Log}(r) - 10\mathrm{Log}(4\pi) = L_W - 20\mathrm{Log}(r) - 11.$$

(basta considerare che la pressione sonora è ottenibile dividendo la potenza sonora per la superficie sferica)

Campo emisferico (presenza del suolo, considerato perfettamente assorbente)

Essendo metà la superficie attraversata alla distanza r rispetto al caso precedente abbiamo:

$$L_p = L_W - 10\mathrm{Log}(2\pi r^2) = L_W - 20\mathrm{Log}(r) - 8.$$

N.B. *L'accezione di sorgente puntiforme è del tutto generale: infatti a distanza sufficiente, non solo una macchina, ma addirittura un'intera fabbrica può essere considerata puntiforme.*

Nelle relazioni si è tenuto conto soltanto del fenomeno della divergenza per il quale la pressione sonora si attenua con la distanza dalla sorgente anche in assenza di perdite energetiche.

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

Legame tra livelli di pressione sonora in punti diversi

Le relazioni riportate nella pagina precedente consentono di determinare il legame esistente tra i livelli di pressione acustica in due punti distinti del campo libero. Infatti considerando di operare in un campo acustico libero semisferico ed indicando con i pedici 1 e 2 due punti posti rispettivamente a distanza $\mathbf{r_1}$ ed $\mathbf{r_2}$ da una sorgente caratterizzata dal livello di potenza sonora $\mathbf{L_W}$ avremo:

$$L_{p1} = L_W - 20\mathrm{Log}(r_1) - 8 \quad \text{----------------} \quad L_{p2} = L_W - 20\mathrm{Log}(r_2) - 8$$

dalle quali per differenza otteniamo

$$\boxed{L_{p1} - L_{p2} = 20\mathrm{Log}(r_2) - 20\mathrm{Log}(r_1) = 20\mathrm{Log}(r_2/ r_1)}$$

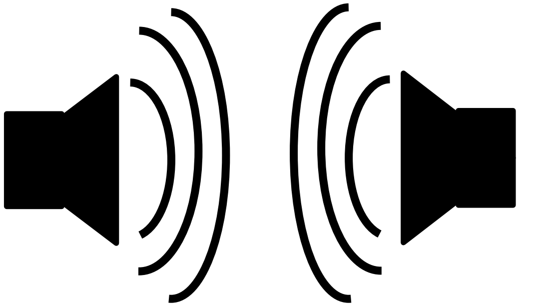
La relazione precedente è di fondamentale importanza pratica perché consente di stimare il livello di pressione sonora in un punto qualunque noto che sia, ad esempio tramite la sua misura, il livello di pressione sonora in un altro punto.

Si noti che è semplice misurare il livello di pressione sonora, ma non è possibile misurare direttamente la potenza sonora emessa da una data sorgente.

Acustica – GRANDEZZE FONDAMENTALI

❖ APPROFONDIMENTO: SOMMA di SEGNALI

$$L_1 = 10 \cdot \lg \frac{P_1^2}{P_0^2} [dB] \qquad L_2 = 10 \cdot \lg \frac{P_2^2}{P_0^2} [dB]$$



- **SOMMA COERENTE, i segnali si sommano in fase, ad esempio segnali generati da due speaker identici comandati dallo stesso generatore disposti simmetricamente rispetto al piano di misura**
  - **I segnali si sommano in fase**

$$L_{TOT} = 10 \cdot \lg \frac{(P_1 + P_2)^2}{P_0^2} [dB]$$

- **SOMMA INCOERENTE normalmente i segnali sono generati da sorgenti differenti, a istanti differenti e percorrono cammini di propagazione diversi**
  - **Si sommano i contenuti energetici dei segnali**

$$L_{TOT} = 10 \cdot \lg \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} [dB]$$

ANALISI IN FREQUENZA

- Esistono diversi tipi di segnali che hanno andamenti temporali diversi i quali dipendono dal fenomeno fisico che li genera
  - Deterministici
    - Descrivibili mediante funzioni matematiche e riproducibili mediante la ripetizione di un ben definito esperimento
      - Sinusoidali, periodici complessi, quasi periodici, transienti
      - *Es: macchina rotativa a regime con massa eccentrica, risposta a un'eccitazione a gradino di una struttura*
  - Random
    - Descrivibili solo in termini statistici, non è possibile progettare un esperimento che se ripetuto dia sempre gli stessi risultati
      - Stazionari, non stazionari
      - *Es: rumore di un ventilatore in un condotto*
- Lo studio sperimentale di fenomeni connessi all'emissione acustica richiede il passaggio dal dominio del tempo al dominio della frequenza

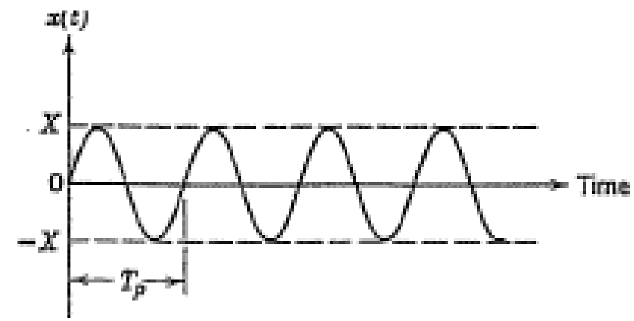
ANALISI IN FREQUENZA

SEGNALI PERIODICI:

- **Sinusoidali**

$$x(t) = X \sin(2\pi f t + \theta)$$

X : ampiezza
f : frequenza
θ : fase



- **Periodici Complessi**

$$x(t) = x(t + nT_p) \qquad n = 1,2,3,...$$

Un segnale periodico, di periodo Tp, può essere espresso come una serie di funzioni armoniche semplici

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n f_1 t + b_n \sin 2\pi n f_1 t)$$

$$f_1 = \frac{1}{T_p}$$ Frequenza fondamentale

$$a_n = \frac{2}{T_p}\int_0^{T_p} x(t)\cos 2\pi n f_1 t \, dt \qquad n = 0,1,2,...$$

$$b_n = \frac{2}{T_p}\int_0^{T_p} x(t)\sin 2\pi n f_1 t \, dt \qquad n = 1,2,3,...$$

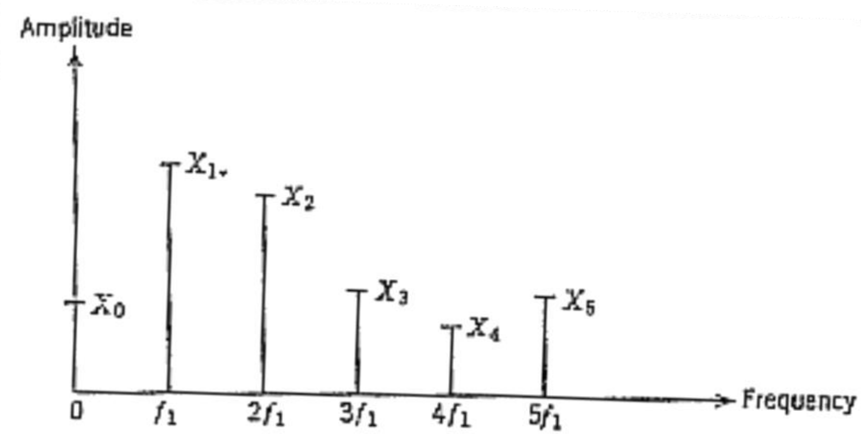
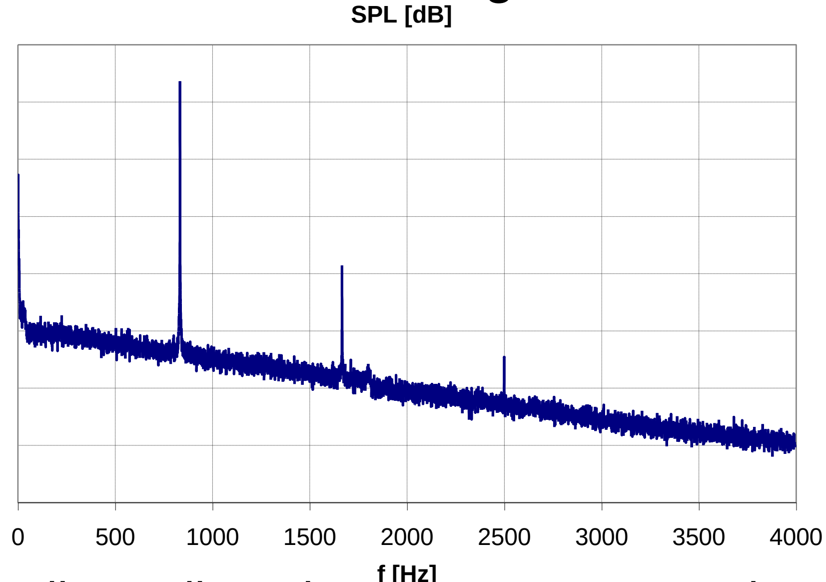


Figure 1.4 Spectrum of complex periodic data.

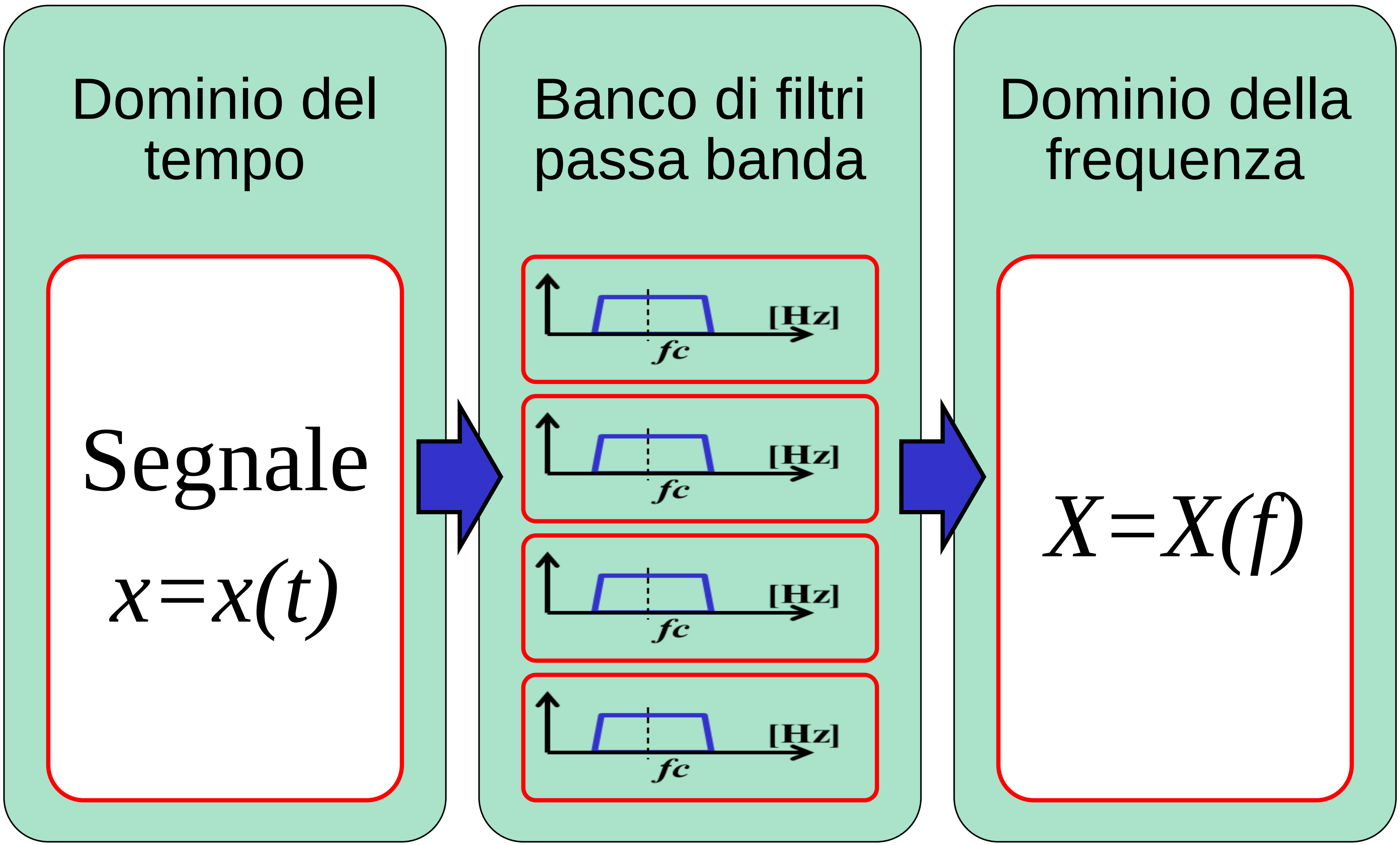
ANALISI IN FREQUENZA

- Il rumore è generalmente composto da una sovrapposizione di segnali di frequenza diversa distribuite all'interno di una certa banda, la distribuzione di ampiezza in funzione delle varie frequenze viene definita **spettro**
- **Esempio: spettro di rumore rilevato in galleria del vento**



- Per indagare il contributo di ogni componente armonica alla realizzazione del rumore e investigare i meccanismi di generazione occorre effettuare **un'analisi in frequenza**.

ANALISI IN FREQUENZA



Acustica – BANDE DI FREQUENZA

- La strumentazione dedicata alle misure di rumore è dotata di una serie di filtri, il segnale viene analizzato in un numero discreto di **bande di frequenza-ISO266**
- Strumentazione con **larghezza di banda proporzionale**: le frequenze di taglio inferiore e superiore sono in rapporto costante per tutte le bande
- La **frequenza centrale di banda** è data dalla media geometrica dei valori superiore e inferiore

$$\frac{f_u}{f_l} = cost. \begin{cases} =2, \text{ bande di ottava} \\ =2^{1/3} \text{ bande di terzi d'ottava} \end{cases}$$

$$f_c = \sqrt{f_u f_l}$$

Numero di banda	Frequenza centrale nominale dei terzi [Hz]	Frequenza centrale effettiva [Hz]	Limiti di banda di terzi d'ottava [Hz]		Frequenza centrale nominale delle ottave [Hz]	Limiti di banda di ottava [Hz]
13	20	19,95	17.8 - 22.4			
14	25	25,12	22.4 - 28.2			
15	31,50	31,62	28.2 - 35.5		31,5	22,4 – 44,7
16	40	39,81	35.5 - 44.7			
17	50	50,12	44.7 - 56.2			
18	63	63,1	56.2 - 70.8		63	44,7 – 89,1
19	80	79,43	70.8 - 89.1			
20	100	100	89.1 - 112			
21	125	125,89	112 - 141		125	89,1 – 178
22	160	158,49	141 - 178			
23	200	199,53	178 - 224			
24	250	251,19	224 - 282		250	178 – 355
25	315	316,23	282 - 355			
26	400	398,11	355 - 447			
27	500	501,19	447 - 562		500	355 – 708
28	630	630,96	562 - 708			
29	800	794,33	708 - 891			
30	1000	1000	891 - 1120		1000	708 – 1410
31	1250	1258,93	1120 - 1410			
32	1600	1584,89	1410 - 1780			
33	2000	1995,26	1780 - 2240		2000	1410 – 2820
34	2500	2511,89	2240 - 2820			
35	3150	3162,28	2820 - 3550			
36	4000	3981,07	3550 - 4470		4000	2820 – 5620
37	5000	5011,87	4470 - 5620			
38	6300	6309,57	5620 - 7080			
39	8000	7943,28	7080 - 8910		8000	5620 – 1120
40	10000	10000	8910 - 11200			
41	12500	12589,25	11200 - 14100			
42	16000	15848,93	14100 - 17800		16000	1200 – 2240
43	20000	19952,62	17800 - 22400			

Acustica – BANDE DI FREQUENZA

Rappresentazione del rumore in bande di ottava e in terzi di bande di ottava

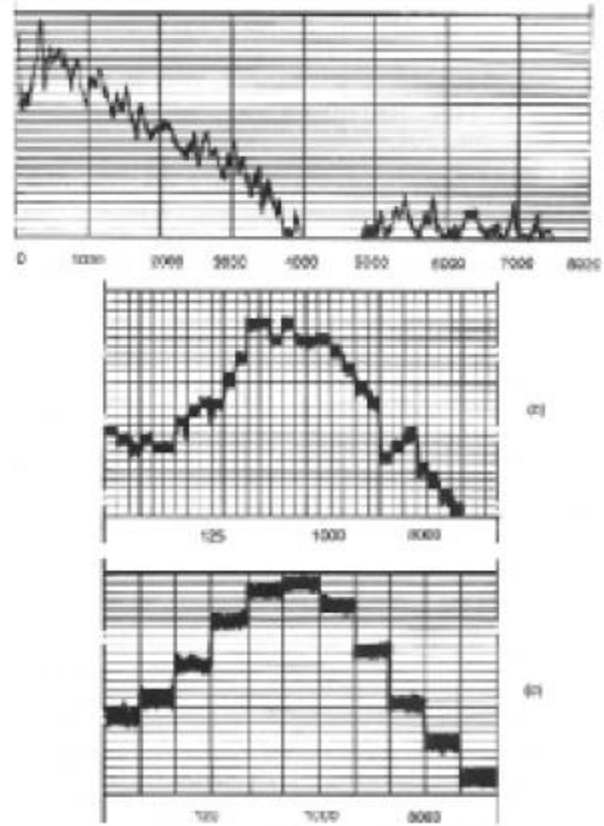
Si riportano a fianco tre tipici spettri in frequenza di un rumore.

Il primo spettro rappresenta l'analisi continua, dalla quale si osserva il contenuto in frequenza del segnale originale, distribuito nella banda 0-8000 Hz.

Il secondo è relativo allo stesso segnale, ma rappresentato in terzi di banda di ottava.

Il terzo riporta la rappresentazione in bande di ottava.

Si nota come nella rappresentazione per bande non si osserva il buco di frequenze nell'intervallo 4000-5000 Hz.



Acustica – cenni di psicoacustica

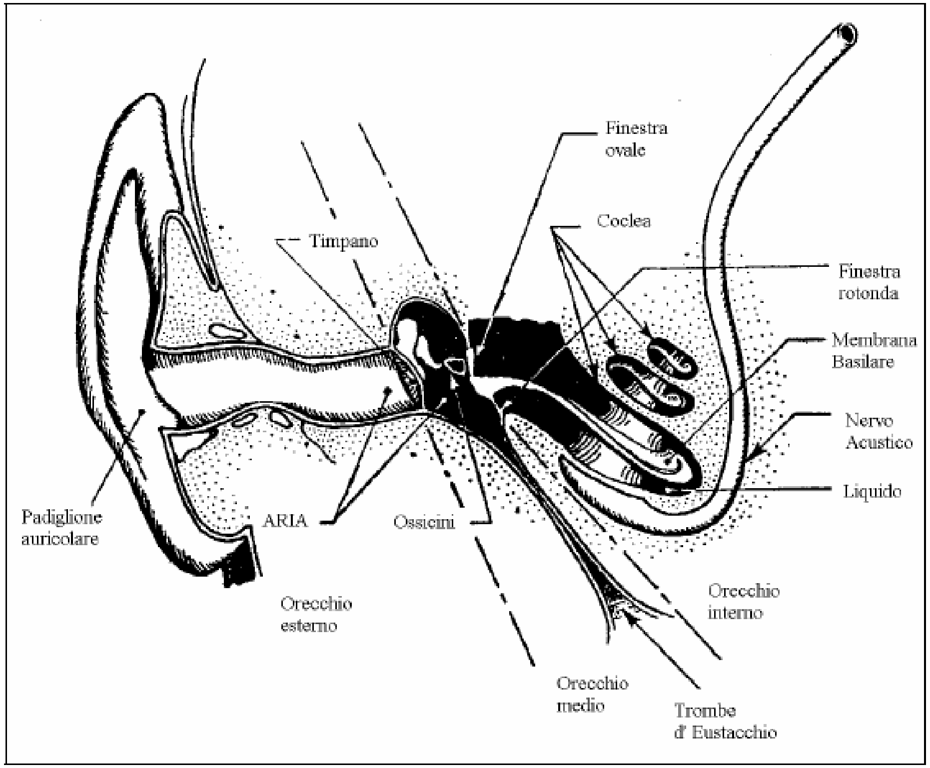


Figura 3-1: Sezione dell'orecchio umano

Livello di pressione [dB]	Pressione [µPa]	Esempi
140	200000000	Soglia del dolore
110	6324555	Discoteca
100	2000000	Tipografia
90	632455	Cartiera
80	200000	Betoniera a 15 m
70	63245	Traffico urbano
60	20000	Uffici
50	6324	Residenza urbana
40	2000	Biblioteca
30	632	Abitazione di notte
20	200	
10	63	
0	20	Soglia dell'udibile

Tabella 1-1 : Corrispondenza tra decibel e pressione acustica
i diversi livelli acustici espressi in decibel.

Livello di pressione acustica [dBA]	Caratteristica del danno uditivo
0 - 35	Rumore che non arreca né fastidio né danno
36 - 65	Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno e il riposo
66 - 85	Rumore che disturba e affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo e in alcuni casi danno uditivo
86 - 115	Rumore che produce danno psichico e neurovegetativo, che determina effetti specifici a livello auricolare e che può indurre malattia psicosomatica
116 - 130	Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e neurovegetativi
131 - 150 e oltre	Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione; insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

3 - 2: Scala di lesività di Cosa e Nicoli.

Effetti fisiologici del rumore dipendono dalle caratteristiche fisiche del rumore intensità, composizione spettrale e tempo di esposizione

Acustica – CURVE ISOFONICHE e CURVE DI PONDERAZIONE

- Fletcher tracciò sperimentalmente delle curve a uguale sensazione uditiva **(LOUDNESS)**, tali curve riportano al variare della frequenza il livello di pressione sonora che restituisce la stessa sensazione uditiva del tono puro a 1kHz per uno specifico SPL.
- Il livello alla frequenza di riferimento definisce l'unità di misura del livello di sensazione uditiva, il **phon**

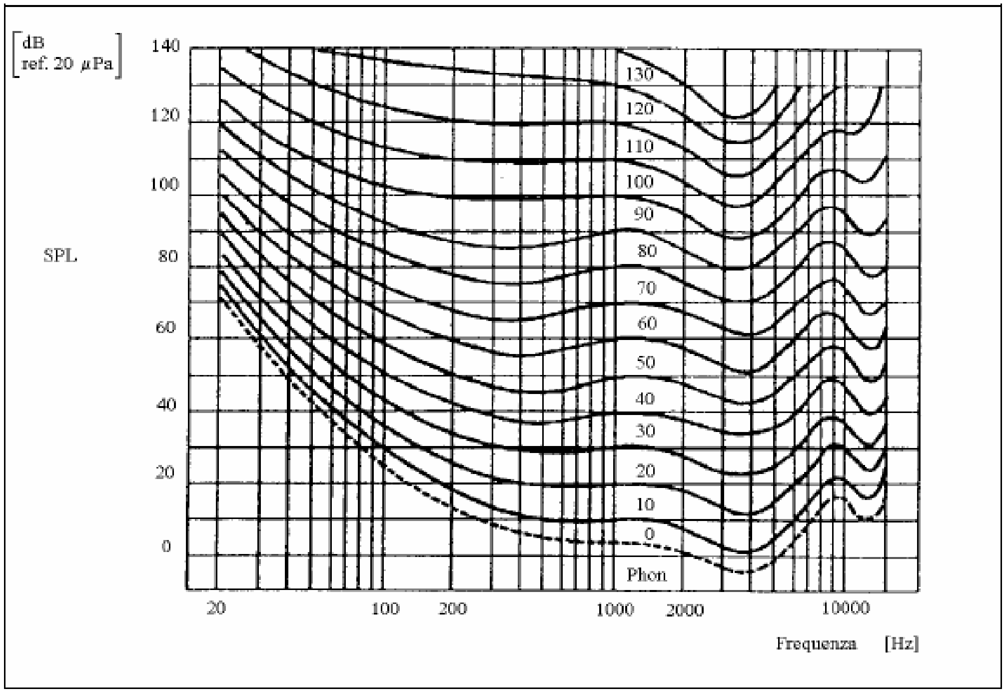


Figura 3-5: Curve isofoniche proposte dalla Raccomandazione ISO/R 226 per toni puri in campo libero con sorgente di rumore frontale

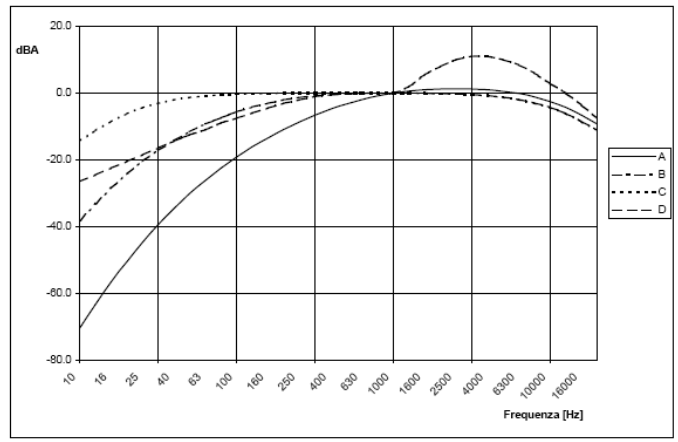


Figura 3-6: Curve di ponderazione.

•Curva A: toni puri 40phon

•Curva B: toni puri tra 55dB e 85dB

•Curva C: toni puri >85dB

La misura pesata si indica con **dB(A)**

FINE

Esistono effetti psicofisici diversi a seconda delle caratteristiche del rumore?

Per comprendere meglio le conseguenze psicofisiche del rumore, è opportuno procedere ad una classificazione delle diverse tipologie di rumore. E' importante notare che tali tipologie sono prese anche in considerazione dalle normative ed opportunamente trattate:

•***rumore continuo:*** caratterizzato da livello energetico relativamente costante nel tempo di osservazione;

•***rumore discontinuo:*** caratterizzato dal fatto che durante il tempo di osservazione si interrompe più volte per periodi non inferiori al secondo;

•***rumore a tempo parziale:*** caratteristico di una sorgente che funzioni in modo continuo o discontinuo per un periodo limitato del giorno;

•***rumore impulsivo:*** caratterizzato da impulsi sonori isolati di breve durata ed intensità molto elevata chiaramente udibili nel rumore complessivo (secondo l'OSHA - Occupational Safetyand Healt Administration- sono da considerarsi impulsivi i rumori che raggiungono il loro valore di picco in meno di 0.035 s e che si ripetono nel tempo con cadenza inferiore al secondo. Esempi tipici di componenti impulsive nel rumore rilevabile in ambiente industriale sono i rumori prodotti da magli e presse);

•***rumore impulsivo ripetitivo:*** caratterizzato dalla presenza di componenti impulsive di intensità minore rispetto al caso precedente ma emessi con cadenza di ripetizione più elevata (da 30 a 600 eventi impulsivi al minuto);

•***rumore con componenti tonali:*** caratterizzato dalla presenza di una componente a frequenza fissa chiaramente avvertibile, sovrapposta al restante rumore ambiente.

Attualmente come indice rappresentativo del rumore non si utilizza più il livello di pressione (SPL: Sound Pressure Level) ponderato A, ma piuttosto il livello equivalente A espresso come:

$$L_{eq}(A) = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p_A(t)}{p_0} \right)^2 dt \qquad (3.5)$$

dove:

T è il periodo di misura.

$P_A(t)$ è la pressione acustica efficace istantanea ponderata A.

Analizzando la (3-5) è immediato vedere che il livello equivalente rappresenta l'energia acustica presente nel punto di misura nel periodo considerato.

La legge 277/91 si occupa del problema dei rischio derivante dall'esposizione dei lavoratori all'inquinamento da agenti nocivi di natura chimica, fisica o biologica (piombo, amianto, rumore).

Ci occuperemo solo della parte riguardante il rumore.

Il parametro fondamentale di valutazione è il livello di esposizione di un lavoratore, definito come il livello equivalente di rumore assorbito da un lavoratore nell'arco di una giornata lavorativa, riportato alle otto ore di lavoro.

In termini matematici viene espresso come:

$$L_{EP,d} = L_{Aeq,Te} + 10 \log_{10} \frac{T_e}{T_0} \qquad (6.11)$$

dove:

$L_{EP,d}$ è il livello di esposizione giornaliero al rumore.

$L_{Aeq,Te}$ è il livello equivalente di rumore pesato A, assorbito da un singolo lavoratore durante il periodo di lavoro.

T_e è il tempo di esposizione al rumore.

T_0 è il tempo di riferimento pari a 8 ore.

Riconoscimento di componenti impulsive nel rumore: Nel caso si riconosca soggettivamente la presenza di componenti impulsive ripetitive nel rumore, si procede ad una verifica. Si effettua una misura del livello massimo del rumore con costante di tempo "slow" ed "impulse". Se la differenza dei valori massimi sia superiore a 5 dB(A), viene riconosciuta la presenza di componenti impulsive penalizzabili nel rumore. In tal caso il rumore misurato di Leq(A) deve essere maggiorato di 3 dB(A).

Riconoscimento di componenti tonali nel rumore: Nel caso si riconosca soggettivamente la presenza di componenti tonali nel rumore, si procede ad una verifica. Si effettua una analisi spettrale del rumore per bande ad 1/3 di ottava. Quando, all'interno di una banda di 1/3 di ottava, il livello di pressione sonora supera di almeno 5 dB i livelli di pressione sonora di ambedue le bande adiacenti viene riconosciuta la presenza di componenti tonali penalizzabili nel rumore. In tal caso il rumore misurato di Leq(A) deve essere maggiorato di 3 dB(A).

Presenza contemporanea di componenti impulsive e tonali nel rumore:
Nel caso si rilevi la presenza contemporanea di componenti impulsive e tonali nel rumore come indicato in precedenza, il rumore misurato di Leq(A) deve essere maggiorato di 6 dB(A).