Università degli Studi di Firenze
Facoltà di Architettura

Dispense di acustica di base per i corsi di Fisica Tecnica di Carletti, Sciurpi, Secchi

Tratte da: G. Cellai, S. Secchi, "Fondamenti di acustica", CLU editore

1. RICHIAMI DI ACUSTICA FISICA

Da un punto di vista fisico per suono in un certo punto dello spazio si intende una rapida variazione di pressione (compressione e rarefazione) intorno al valore assunto dalla pressione atmosferica in quel punto. Si definisce **sorgente sonora** qualsiasi dispositivo, apparecchio ecc. che provochi direttamente o indirettamente (ad esempio per percussione) dette variazioni di pressione: in natura le sorgenti sonore sono quindi praticamente infinite come ognuno può constatare; affinché il suono si propaghi occorre poi che il mezzo che circonda la sorgente sia dotato di elasticità. La porzione di spazio *interessata* da tali variazioni di pressione è allora definita **campo sonoro.**

Al solo fine esemplificativo immaginiamoci che la generazione del suono avvenga mediante una sfera pulsante *in un mezzo elastico* come l'aria; le pulsazioni provocano delle variazioni di pressione intorno al valore della pressione atmosferica che si propagano nello spazio circostante a velocità finita come onde sferiche progressive nell'aria stessa (vedi figura 1), similmente a quanto si osserva gettando un sasso in uno stagno: le varie particelle del mezzo entrano in vibrazione propagando la perturbazione alle particelle vicine e così via fino alla cessazione del fenomeno perturbatorio.

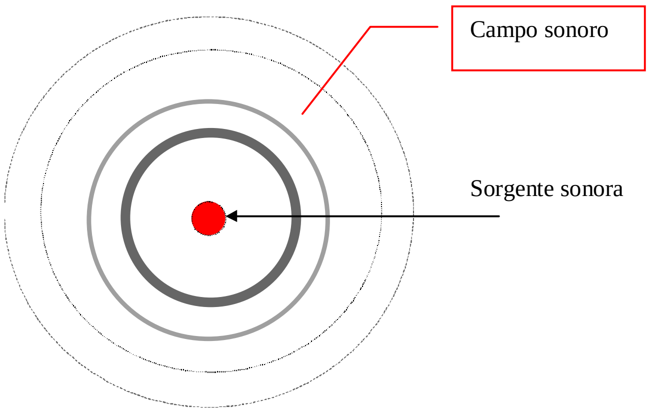

Figura 1: Schema di generazione del suono

Qualora le oscillazioni sonore abbiano una **frequenza** (numero di cicli in un secondo) compresa all'incirca tra 20 e 20.000 Hz[1] (campo di udibilità) ed una **ampiezza**, ovvero contenuto energetico, superiore ad una certa entità minima di pressione pari a $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, definita soglia di udibilità, (inferiore di circa 5 miliardi di volte alla pressione atmosferica standard di 1013 mbar), queste sono allora udibili dall'orecchio umano e possono talora suscitare sensazioni avvertite

[1] il numero delle variazioni di pressione compiute in un secondo viene chiamato **frequenza** del suono e si misura in Hertz (simbolo Hz o s^{-1}).

come fastidiose o sgradevoli, cui attribuiamo genericamente la denominazione di **“rumore”**, anziché di suono.

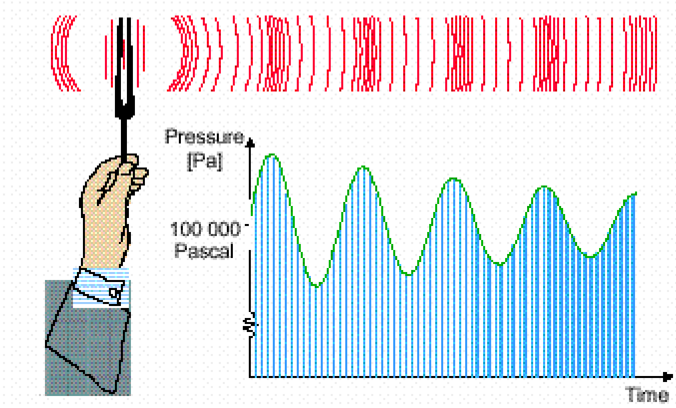

Figura 2:variazione della pressione in funzione del tempo.

Appare poi evidente il primo aspetto fondamentale del fenomeno fisico in esame che risulta essenzialmente influenzato dallo spettro di emissione della sorgente sonora: tutto lo studio dell’acustica architettonica è sostanzialmente incentrato **sull’analisi spettrale** delle sorgenti e sulle modalità di risposta dei mezzi adottati per il controllo del fenomeno (riflessione, assorbimento e trasmissione dell’energia sonora incidente).
Nel caso più semplice si può ipotizzare che dette variazioni di pressione seguano una legge sinusoidale (moto armonico), in tal modo lo strato d'aria adiacente alla sfera subirà espansioni e contrazioni con la stessa frequenza della sfera, e così per gli strati d'aria concentrici successivi in modo che, dopo un certo tempo, in tutti i punti del mezzo che circonda la sfera si hanno delle variazioni periodiche di pressione.
In sintesi le condizioni essenziali per la generazione, propagazione e udibilità del suono così come definito sono quattro:

- la presenza di un mezzo elastico (nel vuoto non c’è propagazione sonora);
- una variazione di pressione nel mezzo intorno ad un valore di equilibrio (ad esempio la pressione atmosferica);
- una frequenza delle variazioni di pressione compresa nel campo udibile;
- un contenuto energetico superiore ad una soglia minima di udibilità.

In campo sonoro la distanza che intercorre tra due successive compressioni, o rarefazioni, è definita **lunghezza d'onda** λ del suono nel mezzo considerato; la situazione del campo sonoro ad un dato istante può essere rappresentata mediante il grafico di figura 3 dove in ordinata sono riportate le variazioni della pressione in funzione della distanza perturbata; con Δp_{max} si indica l’ampiezza ovvero il valore massimo della variazione di pressione.

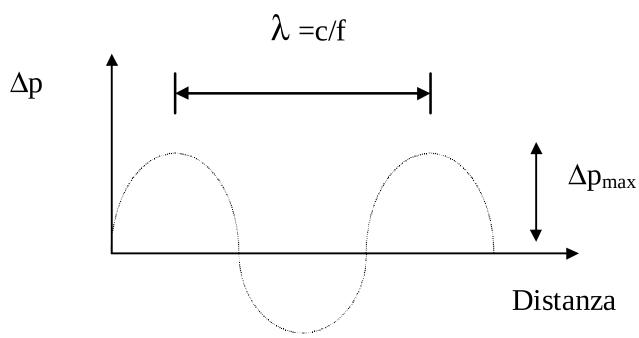

Figura 3: Suono sinusoidale: variazione in funzione della distanza

Analogamente la situazione del campo sonoro può essere analizzata osservando come varia la pressione in un punto in funzione del trascorrere del tempo: in tal caso graficamente il fenomeno è del tutto analogo a quello riportato in fig.3, ma avendo questa volta in ascissa il tempo ed in luogo della lunghezza d'onda λ il **periodo T**, tempo necessario a compiere un ciclo, ovvero l'intervallo di tempo che passa tra due istanti consecutivi nei quali, nel punto considerato, si ha un massimo od un minimo relativo della pressione (vedi figura 4).

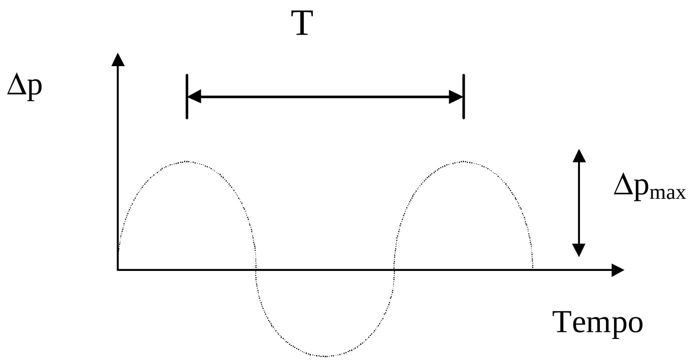

Figura 4: Suono sinusoidale: variazione in funzione del tempo

La frequenza f è legata al periodo T dalla relazione:

$f = 1/T$ (s^{-1} o Hz)

La relazione che lega la velocità di propagazione **c** del suono nel mezzo alla lunghezza d'onda λ ed alla frequenza **f** è la seguente:

$$c = \lambda \cdot f = \lambda \cdot 1/T \quad (m \cdot s^{-1}) \tag{1.1}$$

$$f = c/\lambda \quad (\text{Hz ovvero } s^{-1}) \tag{1.2}$$

Nel nomogramma di figura 5 è visualizzato il rapporto che intercorre tra λ e f.

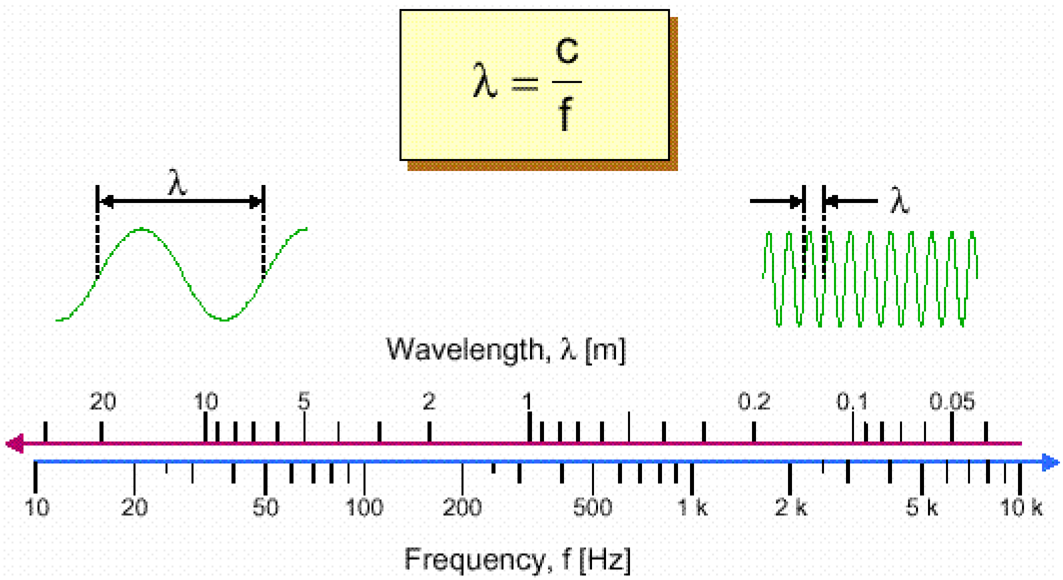

Figura 5: Nomogramma lunghezza d'onda-frequenza

Dalla relazione (1.1) si deduce che nel campo dei suoni udibile la lunghezza d'onda varia da un minimo di circa 20 mm (a 18kHz) a circa 17 m (a 20 Hz): ciò evidenzia la difficoltà nel controllo delle sorgenti sonore caratterizzate da elevato contenuto energetico alle basse frequenze.
Le variazioni di pressione Δp, come accennato, sono sia positive (compressione) che negative (rarefazione), pertanto per esprimere con un unico valore la loro entità non si può ricorrere al loro valore medio che risulterebbe nullo.
Si introduce allora il concetto di **pressione sonora efficace** definita come il valore medio efficace delle variazioni di pressione dato dalla seguente relazione (vedi figura 6):

$$p_{eff} = \left(\int_0^T \Delta p^2 \, d\tau \, / \, T\right)^{1/2} \qquad (1.4)$$

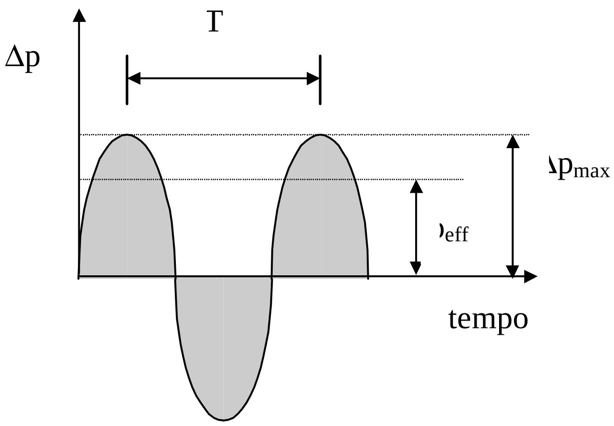

Figura 6: Pressione sonora efficace

Un suono corrispondente ad una variazione perfettamente sinusoidale della pressione con un'unica frequenza è detto **tono puro** (o suono puro); per un tono puro la pressione sonora efficace è data dalla seguente espressione:

$$p_{eff} = \Delta p_{max} / 2^{1/2} \qquad (1.5)$$

Il parametro suddetto usualmente è denominato **pressione sonora p** e rappresenta quindi il **valore efficace delle variazioni di pressione**; in seguito tale grandezza sarà semplicemente indicata con tale denominazione. Volendo fare un'analogia con il riscaldamento di un ambiente si rileva che, come la temperatura misura gli effetti della potenza termica emessa da un radiatore, così la pressione sonora misura gli effetti della potenza sonora emessa da una sorgente rappresentata, ad esempio, da un televisore o da una persona che parla.
Ben poche sorgenti sonore danno un suono puro (v. figura 7), in generale si ha a che fare con suoni complessi non rappresentabili con una semplice sinusoide; tuttavia i suoni, comunque complessi, sono sempre composti da un *numero variabile di suoni perfettamente sinusoidali*; se i componenti del suono sono costituiti da una frequenza fondamentale e da un numero finito o infinito di frequenze che stanno in rapporti semplici con la frequenza fondamentale il suono risultante è un suono periodico o **armonico** (vedi figura 8); i suoni complessi sono pertanto aperiodici_in quanto che la frequenza delle componenti sinusoidali varia con continuità (v. figura 9).

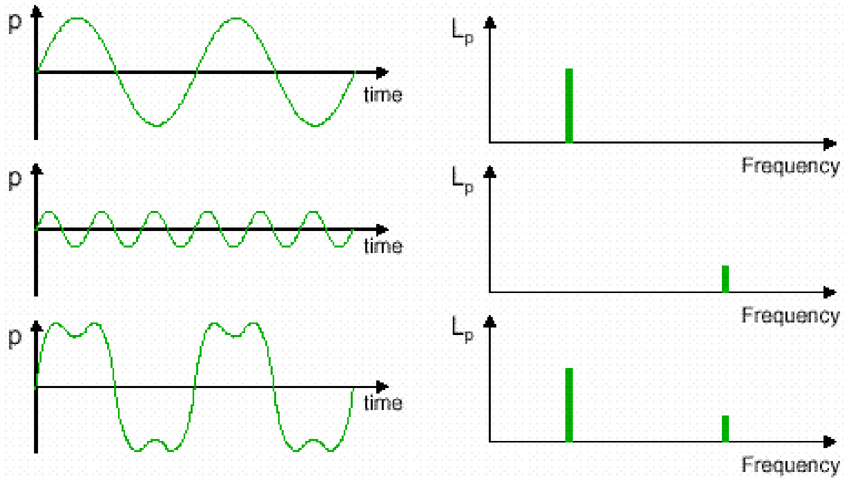

*Figura 7: **Suoni puri ed armonici***

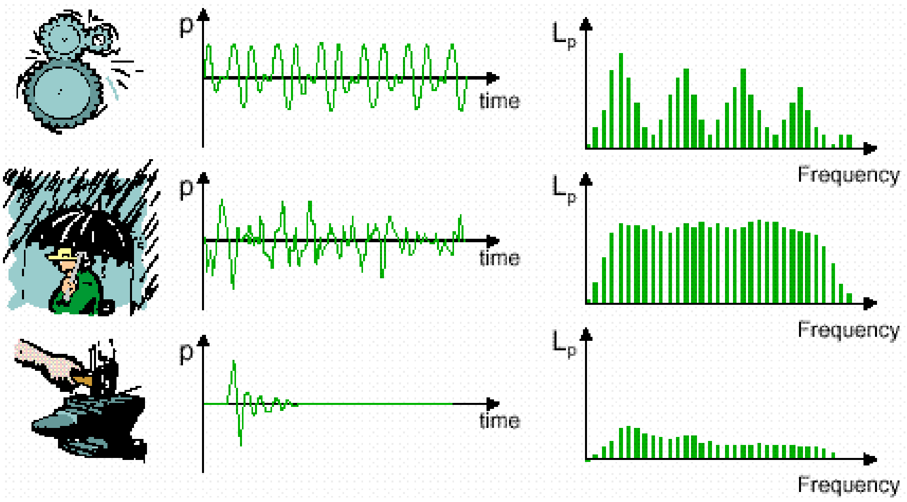

Figura 8:Suoni complessi o aperiodici.

1.1 La propagazione del suono nei mezzi elastici

Le particelle entrate in vibrazione, come detto, trasmettono la perturbazione (compressione e rarefazione) a quelle vicine oscillando intorno alla loro posizione di equilibrio.
Le suddette modalità di trasmissione delle vibrazioni locali valgono sia per i solidi che per i fluidi. Nel caso dei fluidi, le vibrazioni sono tuttavia sempre parallele alla direzione di propagazione dell'onda, per cui si parlerà di onde longitudinali, mentre nel caso dei solidi, che possono trasmettere sforzi di taglio, vi saranno anche onde trasversali o flessionali.
Nei solidi, la velocità di propagazione delle onde flessionali (c_B) è diversa da quella delle onde longitudinali (c_L).
La velocità di propagazione del suono nell'aria c_0, assimilando il suo comportamento ad un gas perfetto, in condizioni di temperatura di 20 °C e pressione ordinarie (1,013 bar), è pari a circa 340 m/s; essa è comunque funzione della temperatura (e quindi della sua densità) secondo la relazione empirica seguente:

$$c_0 = 331{,}2 + 0{,}6 \cdot \theta \text{ (m/s)}$$

dove θ è la temperatura dell'aria in °C.
La velocità aumenta quindi all'aumentare della temperatura (e quindi al diminuire della densità) e viceversa.
In generale la velocità di propagazione longitudinale c_L del suono in un mezzo solido elastico, ad esempio un divisorio assimilato per semplicità ad una barra sottile, è funzione del modulo di elasticità (o di Young) E (Pa) e della densità ρ (kg/m³) secondo la seguente relazione:

$$c_L = (E/\rho)^{1/2} \quad (m/s)$$

per un solido a forma di piastra indefinita si ha:

$$c_L = \{E/[\rho \cdot (1-\nu^2)]\}^{1/2}$$

dove ν è il coefficiente di Poisson.

Nella Tabella 1 sono riportati per alcuni materiali i suddetti valori di E, ρ e σ.

materiale	E N/m²	ρ Kg/m³	σ
Mattoni pieni	$2{,}5 \times 10^{10}$	1800	0,3
Calcestruzzo	$2{,}6 \times 10^{10}$	2800	0,3
Vetro	7×10^{10}	2500	0,23
Marmo	$3{,}8 \times 10^{10}$	2600	0,3
Gesso	$1{,}5 \times 10^{10}$	900	0,3
Legno	$1{,}2 \times 10^{10}$	700	0,3
Alluminio	$7{,}3 \times 10^{10}$	2700	0,33
Piombo	$1{,}7 \times 10^{10}$	11300	0,43
Acciaio	20×10^{10}	7800	0,29

Tabella 1: Valori del modulo di elasticità, della densità e del coefficiente di Poisson per alcuni materiali.

Il comportamento dei materiali in relazione alla attitudine di trasmettere suoni dall'aria agli stessi può essere messo in relazione con la loro *impedenza acustica* rapportata a quella dell'aria, ovvero dalle modalità di accoppiamento dei due mezzi di propagazione sonora contigui; l'impedenza acustica z di un generico materiale può essere definita come il prodotto della sua densità ρ per la velocità di propagazione longitudinale del suono c_L nello stesso (espressa in rayl).
Per l'aria, essendo la sua densità, in condizioni di temperatura di 20°C ed alla pressione atmosferica di 1,013 bar, pari a circa 1,2 kg/m³ e la velocità di propagazione pari a circa 340 m/s, l'impedenza vale circa 400 rayl.
La capacità di trasmettere energia sonora tra l'aria e mezzi diversi si può quindi desumere dal coefficiente di riflessione dell'energia sonora incidente mediante la seguente relazione:

$$r = (z_1 - z_2/z_1 + z_2)^2$$

dove z_1 è l'impedenza acustica dell'aria e z_2 quella del generico materiale.

Nella Tabella 2 sono riportati i valori dell'impedenza acustica per alcuni tipici materiali, dalla quale si rileva la differenza esistente tra i valori dei mezzi aeriformi rispetto a quella, notevolmente più elevata, dei mezzi solidi (ad es. una muratura in mattoni presenta una impedenza acustica circa 16.000 volte più grande di quella dell'aria), ne consegue, in generale, che gran parte dell'energia sonora incidente sugli stessi viene riflessa essendo il valore di r dedotto dalla suddetta relazione prossimo all'unità.

Materiale	c (m/s)	δ (kg/m^3)	ρ.c x 10^{-5} (rayl)
Metalli:			
Acciaio	5000	7800	390
Alluminio	5100	2700	138
Argento	2600	10500	270
Nickel	4970	8700	430
Oro	2000	19300	386
Ottone	3500	8400	295
Piombo	1220	11400	138
Platino	2650	21400	572
Rame	3560	8900	317
Stagno	2500	7300	182
Zinco	3700	7000	259
Non metalli:			
Ardesia	4500	3000	135
Avorio	3010	1800	54
Gomma	54	1000	0,54
Granito	3950	2700	107
Marmo	3810	2700	103
Mattone	3650	1800	66
Sughero	500	240	1,2
Vetro	5500	2600	142

Materiale	c (m/s)	δ (kg/m^3)	δ c x 10^{-5} (rayl)
legno nel senso della fibra:			
Abete	4640	450	20,8
Acero	4110	670	27,8
Faggio	3340	750	25,0
Frassino	4670	700	32,7
Olmo	4120	570	23,4
Pino	3320	500	16,6
Pioppo	4280	370	15,9
Quercia	3850	800	30,7
Idem, trasversalmente alla fibra:	valori ridotti ad 1/3		
liquidi			
Acqua a 13°C	1441	1000	14,4
Alcool	1240	800	9,9
Benzina	1166	900	10,5
gas:			
Aria a 0°C	331	1,30	$4,27 \times 10^{-3}$
Aria a 15°C	341	1,21	$4,11 \times 10^{-3}$
Azoto	336	1,25	$4,2 \times 10^{-3}$
Idrogeno	1269	0,09	$1,1 \times 10^{-3}$
Ossigeno	317	1,43	$4,5 \times 10^{-3}$

Tabella 2: ***Valori della velocità di propagazione c_L e dell'impedenza acustica per alcuni materiali***

Osservando la Tabella 2 si rileva come vi sia una stretta relazione tra densità e velocità di propagazione del suono nello stesso mezzo: in generale i materiali solidi, essendo dotati di maggiore densità, sono in grado di trasmettere più velocemente i suoni essendo evidentemente le particelle più a stretto contatto tra loro; tuttavia, avendo una impedenza acustica più elevata a parità di velocità di vibrazione delle loro particelle, necessitano di una maggiore quantità di energia rispetto ai gas ed ai liquidi. L'impedenza acustica è così fisicamente analoga all'impedenza elettrica.
Ciò può essere visualizzato immaginando un pistone posto all'interno di un cilindro di lunghezza infinita (v. figura 9) il cui spostamento, con una frequenza armonica intorno al punto di equilibrio, determina la seguente relazione tra velocità di spostamento delle particelle **v**, pressione **p**, e impedenza acustica specifica **z** (**c** · ρ):

$$v = p/\rho c = p/z \text{ (m/s)} \tag{1.1}$$

e conseguentemente:

$$p = z \cdot v \quad \text{(Legge di Ohm acustica)}^{2} \tag{1.2}$$

[2] Per analgia alla legge di Ohm si ha che la variazione di pressione **Δp** corrisponde alla differenza di potenziale elettrico **V,** l'impedenza acustica **z** alla resistenza elettrica **Re** e l'intensità vibratoria **v** alla intensità di corrente **i**.

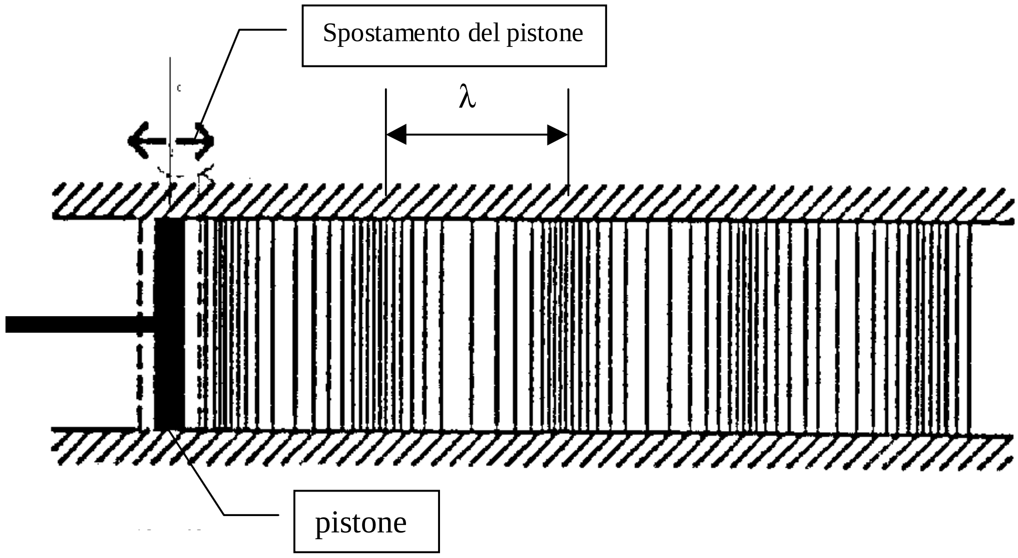

Figura 9: Cilindro di lunghezza infinita contenente un mezzo elastico

In sintesi sono le proprietà elastiche e la massa del mezzo che stabiliscono sia la velocità di vibrazione delle particelle che la velocità con la quale la perturbazione si trasmette sia infine la quantità di energia meccanica (J) trasferita dalla sorgente nell'unità di tempo (potenza sonora espressa in W).

2. PRINCIPALI GRANDEZZE ACUSTICHE

La quantità di energia irradiata da una sorgente sonora nell'unità di tempo è denominata **potenza sonora** $P_{\underline{w}}$ (W). La potenza sonora $P_{\underline{w}}$ emessa da una sorgente è irradiata nel mezzo elastico, come l'aria, attraverso una determinata superficie **S** (o fronte d'onda) come lavoro dovuto al prodotto della forza di pressione **p** per la velocità di spostamento delle particelle **v** intorno al punto di equilibrio. Con riferimento al modello di generazione sonora che ha portato alla formulazione delle relazioni (1.1) e (1.2), la potenza sonora P_w può quindi essere correlata alla pressione sonora dall'equazione:

$$P_w = p \cdot (p/\rho c) \cdot S = (p^2/\rho \cdot c) \cdot S \qquad \text{(W)} \tag{2.1}$$

Per una sorgente che irradia uniformemente in tutte le direzioni (mezzo isotropo), ovvero in campo libero[3], il fronte d'onda S è pari alla superficie di una sfera (v. **figura 10**); alla distanza r dalla sorgente la potenza sonora sarà dunque pari a:

$$P_w = (p^2/\rho c)\, 4\, \pi\, r^2 \tag{2.2}$$

[3] il campo sonoro si distingue idealmente in campo libero (spazio ideale privo di riflessioni) e campo diffuso (spazio perfettamente diffondente delimitato da superfici altamente riflettenti); situazioni intermedie vengono di volta in volta a determinarsi modificando la relazione 2.2.

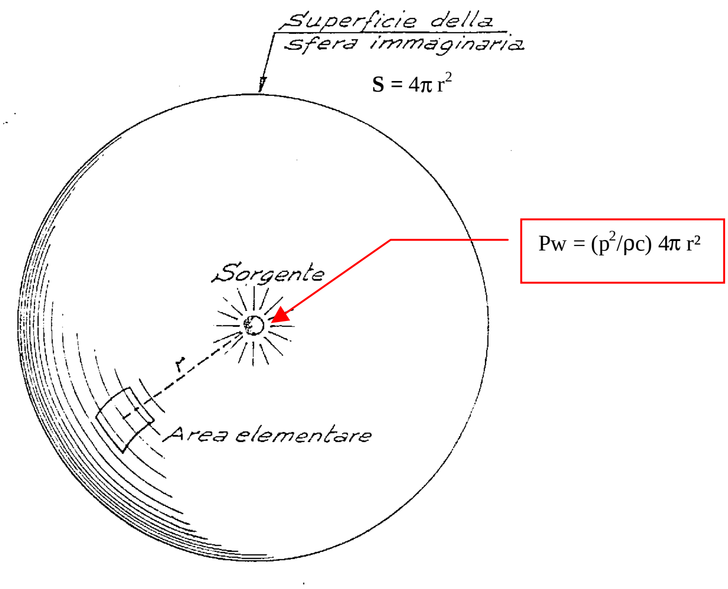

Figura 10:Potenza sonora di una sorgente nello spazio (campo libero)

Nella pratica le sorgenti sonore irradiano con potenze estremamente variabili che vanno dal valore della voce umana a livello di conversazione, pari a circa 10^{-6} W, al rumore di un aereo turbogetto pari a 10^{4} W (v. Tabella 2).

TABELLA 2 TIPICI VALORI DELLA POTENZA SONORA DI ALCUNE SORGENTI (W)									
Sorgente	Aereo turbogetto	Aereo turboelica	Orchestra (75 elem.)	Martello pneum.	Radio Alto vol.	Auto in auto-strada	Ventil. Assiale (1500 giri/1')	Conver-sazione normale	Susurro di voce
Potenza	10^{4}	10^{3}	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}

Sia $P_{\underline{w}}$ (W) la potenza sonora irradiata da una sorgente sonora su un fronte d'onda S (m²), sussiste allora la seguente relazione tra potenza sonora e **intensità sonora I**:

$$I = P_{\underline{w}} / 4 \pi r^2 = p^2/\rho c \quad (W/m^2) \tag{2.3}$$

e quindi l'intensità è l'energia che, nell'unità di tempo, fluisce attraverso l'unità di area del fronte d'onda (v. figura 10).
Mentre la frequenza discrimina la percezione dei suoni, ovvero il loro *tono*, da gravi (bassa frequenza) ad acuti (alta frequenza), analogamente l'intensità discrimina i suoni da deboli a forti.
In campo libero, per la (2.3), si ha dunque la seguente relazione tra pressione sonora e intensità:

$$I = p \cdot v = p^2/\rho c \quad (W/m^2) \tag{2.4}$$

e per la (2.1) si ha che la pressione sonora, in campo libero, risulta così legata alla potenza:

$$p = (P_w \, \rho c / 4 \pi r^2)^{1/2} \tag{2.5}$$

Dalle relazioni suddette si evince che, in campo libero, la pressione sonora e l'intensità diminuiscono con il quadrato della distanza r: per il suono nell'aria, quindi, quando la distanza raddoppia l'ampiezza si riduce della metà.

In un'onda piana invece la superficie del fronte d'onda rimane costante (ad es. nel rumore generato da un elettroventilatore all'interno di un condotto a sezione costante) e se non vi sono dissipazioni sulle pareti del condotto (ad es. materiale fonoassorbente) *l'intensità non varia all'aumentare della distanza.* In definitiva le principali grandezze acustiche sono le seguenti:

GRANDEZZE RIFERITE ALLA SORGENTE SONORA $\Rightarrow$ POTENZA SONORA $\mathbf{P_w}$ (W)

GRANDEZZE RIFERITE $\Rightarrow$ INTENSITÀ **I** (W/m^2)
AL CAMPO SONORO $\Rightarrow$ PRESSIONE SONORA **p** (Pa)

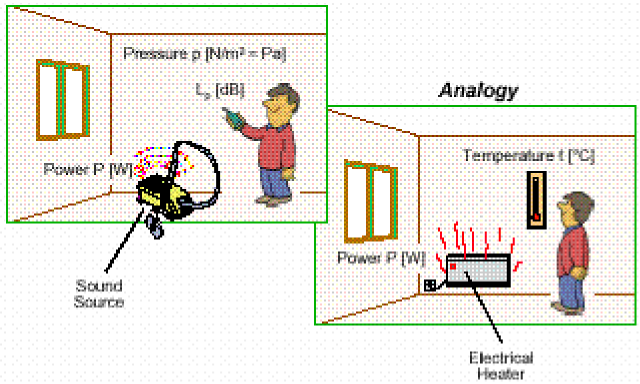

Figura 11: Relazione tra pressione e potenza sonora.

Riprendiamo in esame una sorgente sonora costituita da un pistone che si muove con moto armonico (suono puro) all'estremità di un condotto di lunghezza infinita come in fig.9.
La propagazione del suono avviene in tal caso per onde piane e, per mezzo elastico non viscoso, si può dimostrare che la quantità di energia per unità di volume o **densità di energia sonora D** trasferita dalla sorgente (il pistone) al mezzo è data dalla seguente relazione:

$$D = E/V = \rho\, v^2 \quad (J/m^3) \tag{2.6}$$

dove v è la velocità della superficie del pistone e (per onde piane in un mezzo non viscoso), anche della oscillazione delle particelle nel mezzo. Sostituendo la (2.1) nella (2.7) si ha:

$$D = p^2/\rho\, c^2$$

La densità energetica è anch'essa una grandezza riferita al campo sonoro anche se non trova nel seguito pratica applicazione. Nel corso delle precedenti osservazioni per comodità si è fatto di volta in volta riferimento a fronti di propagazione sonora costituiti da onde piane e sferiche: mentre è evidente che nel caso di onde sferiche (tralasciando altri effetti di dissipazione di energia sonora che vedremo in seguito) l'intensità e la pressione diminuiscono con il quadrato della distanza, ciò non avviene per le onde piane; tuttavia nel caso che il rapporto $k = 2\pi r/\lambda >> 1$ ovvero a distanza r dall'origine molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, le onde sferiche si comportano come onde piane, per cui le relazioni formulate per quest'ultime risultano con buona approssimazione valide anche per sorgente sonora che irradia nello spazio; infine si rileva che se la sorgente è piccola rispetto al campo sonoro questa può essere considerata puntiforme o lineare nel caso di sorgenti di rumore da traffico.

ESERCITAZIONE

Per la sorgente sonora costituita da un pistone all'interno di un cilindro che genera un'onda piana sinusoidale (v. figura 9) si calcoli l'intensità sonora sapendo che la variazione di pressione massima (ampiezza) è pari a 10 Pa.

Dalle relazione (1.5) $p_{eff} = \Delta p_{max} / 2^{\frac{1}{2}}$ si ottiene:

p = 10 / 1,414 = 7,07 Pa

assumendo per l'aria a 20°C z = 400 rayls, l'intensità si ottiene mediante la relazione (2.3):

$I = p^2/z = 7{,}07^2/400 = 0{,}125\ W/m^2$

Per questa stessa sorgente considerata puntiforme si calcoli la potenza sonora a 10 metri di distanza nel caso che la sorgente sia posta nello spazio (ipotesi di campo libero) mediante la relazione Pw = I x S:

$Pw = 0{,}125 \times 4 \times 3{,}14 \times 10^2 = 157\ W$

Per verifica I = Pw/S = 157/1256 = 0,125 W/m^2

Si calcoli infine l'intensità sonora ad una distanza di 20 m da una sorgente puntiforme che irradia in campo libero con una potenza di 1 W; dalla relazione I = Pw/S si ha:

$I = 1/(4 \times 3{,}14 \times 20^2) = 2 \cdot 10^{-4}\ (W/m^2)$

---

3. I LIVELLI SONORI: IL DECIBEL

Nei problemi pratici di acustica, considerato l'enorme campo di variazione delle grandezze in gioco (frequenza e potenza), non conviene esprimere le grandezze acustiche quali la pressione sonora, la potenza e l'intensità in valori assoluti.
Si preferisce quindi esprimere dette grandezze facendo il logaritmo del rapporto tra le stesse e determinati valori di riferimento assunti come livelli "zero".
Questo sistema si è rivelato utile sia perché la scala logaritmica comprime i valori numerici, sia perché l'intensità delle sensazioni uditive è in prima approssimazione proporzionale al logaritmo dello stimolo e non al valore assoluto dello stesso.
In acustica pertanto per le grandezze energetiche si usa adottare il livello sonoro espresso in **decibel** (dB) definito come il logaritmo decimale del rapporto tra il valore in esame ed il valore di riferimento.
Si ha pertanto:

livello di potenza sonora L_w:

$$L_w = 10 \lg P_w / P_0 \quad (dB) \qquad (3.1)$$

dove P_w è la potenza sonora in esame (W) e P_0 la potenza sonora di riferimento (10^{-12} W)

Livello di intensita' sonora L_I:

$$L_I = 10 \lg I/I_0 \quad (dB) \qquad (3.2)$$

dove I è l'intensità sonora in esame (W/m²) e I_0 l'intensità sonora di riferimento (10^{-12} W/m²)

Livello di pressione sonora L_P :

$$L_P = 10 \lg p^2/p_0^2 = 20 \lg p/p_0 \ \text{(dB)} \qquad (3.3)$$

dove p è la pressione sonora in esame (Pa) e p_0 la pressione sonora di riferimento ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa = soglia di udibilità a 1000 Hz).
Agli effetti pratici, per le grandezze di riferimento suddette, si dimostra che $L_I \cong L_P$[4].

Occorre sottolineare il fatto che generalmente i dati di potenza sonora relativi alle sorgenti di volta in volta esaminate devono essere forniti dai costruttori delle macchine mediante apposito certificato, per cui usualmente i valori in questione costituiscono il dato noto da cui partire per il calcolo dei livelli di pressione sonora che si verificano in campo ad una certa distanza dalle suddette sorgenti; talora i dati vengono forniti anche in forma di livelli di pressione sonora rilevati ad una certa distanza dalla sorgente in punti specificati e ben individuabili.
In figura 12 è riportato un confronto tra le scale lineare e logaritmica (dB) della pressione sonora.
L'operare con i livelli, che sono grandezze logaritmiche, richiede alcune considerazioni che possono rivelarsi utili nella pratica. Innanzi tutto si osserva che un raddoppio o un dimezzamento dell'energia sonora non provoca un raddoppio o un dimezzamento nei livelli sonori ma solo incrementi o decrementi di circa 3 dB; quando si calcola ad esempio il livello totale dovuto al contributo di due o più sorgenti sonore agenti contemporaneamente, dobbiamo calcolare il *livello globale* di pressione sonora generato dalle componenti sonore in esame, mediante la seguente procedura:

- si calcola il rapporto $p^2/p_0^2 = 10^{L_{Pi}/10}$ per ciascun livello;
- si effettua la sommatoria dei valori così ottenuti: $\Sigma\, 10^{L_{Pi}/10}$
- si calcola infine il valore del livello globale L_{PT}: $L_{PT} = 10 \lg (\Sigma\, 10^{L_{Pi}/10})$

per due livelli si avrà:

$L_{P1} \Rightarrow 10^{L_{P1}/10}$
$L_{P2} \Rightarrow 10^{L_{P2}/10}$
$L_{PT} = 10 \lg (10^{L_{P1}/10} + 10^{L_{P2}/10})$

[4] la relazione (3.2) può essere riscritta nella forma seguente:
$L_I = 10 \lg [(p^2/p_0^2) \cdot (p_0^2/\rho c\, I_0)] = 10 \lg (p^2/p_0^2) + 10 \lg p_0^2/(\rho c\, I_0) = L_P + 10 \lg k$
dove k è una costante che dipende dalle caratteristiche ambientali; se si assume $\rho c\, I_0 = 400 \cdot 10^{-12}$, essendo $p_0^2 = (20 \cdot 10^{-6})^2 = 400 \cdot 10^{-12}$, si ha $k = p_0^2/\rho c\, I_0 = 1$, e poiché $10 \lg 1 = 0$, risulta che:
$L_I = 10\, I/I_0 = 10 \lg (p^2/p_0^2) = L_P$

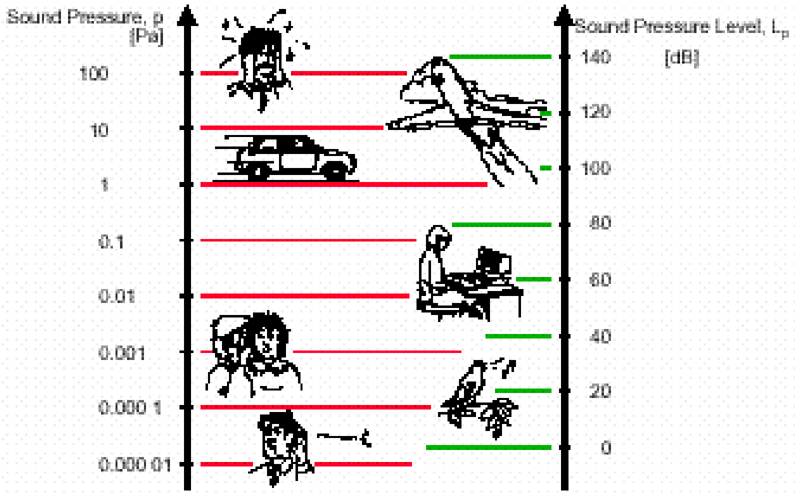

Figura 12: Confronto tra la scale dei decibel di pressione sonora e quella della pressione sonora in Pa.

È inoltre interessante anche l'operazione inversa, ovvero conoscere il contributo offerto da una determinata sorgente al rumore globale L_{PT} rilevato; in tal caso si procede ad una sottrazione nel modo seguente:

$L_{P1} \Rightarrow 10^{L_{P1}/10}$
$L_{PT} \Rightarrow 10^{L_{PT}/10}$
$L_{P2} = 10 \lg (10^{L_{PT}/10} - 10^{L_{P1}/10})$

Nella scala dei livelli il valore di 130 dB (63 Pa) corrisponde alla *soglia del dolore* ovvero il rumore può provocare dei danni fisici immediati all'udito.

ESERCITAZIONE

Si calcoli il livello di intensità sonora per una sorgente avente una intensità pari a $2 \cdot 10^{-4}$ (W/m²); dalla relazione $L_I = 10 \lg I/I_0$ (dB) si ha:

$L_I = 10 \lg 2 – 10 \lg 10^4 + 10 \lg 10^{12} = 3 – 40 + 120 = 83$ dB

Calcolare il livello di pressione sonora di un suono avente una pressione p = 4 Pa.
Dalla relazione $L_P = 20 \lg p/p_0$ (dB) si ha.

$L_P = 20 \lg 4 – 20 \lg 2 + 20 \lg 10^5 = 12 – 6 + 100 = 106$ dB

Si sommi ad esempio due livelli di pressione sonora pari rispettivamente a Lp1 = 70 dB e Lp2 = 50 dB; il livello globale risulterà pari a :

$Lp_T = 10 \lg (10^{70/10} + 10^{50/10}) = 70$ dB,

se anche Lp2 è pari a 70dB si ha:

$Lp_T = 10 \lg (10^{70/10} + 10^{70/10}) = 73$ dB,

quindi occorre un raddoppio dei livelli energetici per avere un incremento di *solo* 3 dB; viceversa nel caso volessimo ridurre significativamente un livello globale molto elevato si vede che il contributo energetico da sottrarre dev'essere anch'esso molto alto. In pratica quando i livelli differiscono tra loro di oltre 10 dB il contributo energetico, in aumento o diminuzione, del livello inferiore è trascurabile.

3.1 Propagazione del suono in campo libero

Dalla relazione (2.5) e passando ai livelli, si ha che in un generico punto in campo libero, posto a distanza r da una sorgente puntiforme omnidirezionale, il livello di pressione sonora è desumibile dalla potenza sonora mediante la seguente relazione:

$$L_p = L_w - 10 \lg 4 \pi r^2 = L_w - 20 \lg r - 11 \quad \text{(dB)} \qquad (3.1.1)$$

dove r è la distanza tra sorgente e ricevitore misurata in metri.

Per superficie emisferica con sorgente ad esempio appoggiata su una superficie riflettente:

$$L_p = L_w - 10 \lg 2 \pi r^2 = L_w - 20 \lg r - 8 \quad \text{(dB)} \qquad (3.1.2)$$

Il secondo termine delle suddette relazioni prende la denominazione di attenuazione per divergenza d'onda A_{div}, ed esprime il fatto che l'energia sonora si distribuisce su di un fronte d'onda avente superficie che aumenta con la distanza.
Noto il livello di potenza sonora della sorgente, le relazioni suddette consentono quindi di prevedere il valore del livello di pressione sonora L_p alla distanza r; trascurando altri effetti di dissipazione sonora si ha che ad ogni raddoppio della distanza sorgente-ascoltatore si dimezza l'ampiezza, ovvero il livello di pressione sonora o di intensità si riduce di 6 dB (legge del campo libero): ad esempio se ci troviamo a distanza di 1 m da una sorgente e ci spostiamo a 2 m da essa, si ha una riduzione di 6 dB; spostandoci a 4 metri si ha una riduzione di 12 dB, a 8 m di 18 dB e così via.
La condizione di campo libero presuppone l'assenza di superfici riflettenti ed ostacoli; tale situazione in pratica può essere ottenuta in laboratorio, nelle *camere anecoiche*, realizzate in modo da ridurre al minimo possibile l'energia riflessa dalle pareti delimitanti la camera (pareti fortemente assorbenti), o ponendosi sulla sommità di un'asta lontano da superfici riflettenti.
Le suddette relazioni valgono per una singola sorgente puntiforme. Vi sono tuttavia delle situazioni quali le infrastrutture stradali, o **n** sorgenti puntiformi in linea equivalenti ad una sorgente di tipo lineare (vedi figura 13) che modificano la relazione (3.1.2) nella seguente:

$$L_p = L_{wL} + 10 \lg [(\alpha_1 - \alpha_2)/r_0 d] - 8 \quad \text{(dB)} \qquad (3.1.3)$$

dove L_{wL} è il livello di potenza sonora per unità di lunghezza della sorgente lineare mentre α_1 e α_2 sono rispettivamente gli angoli (rad) entro i quali viene vista la sorgente lineare.

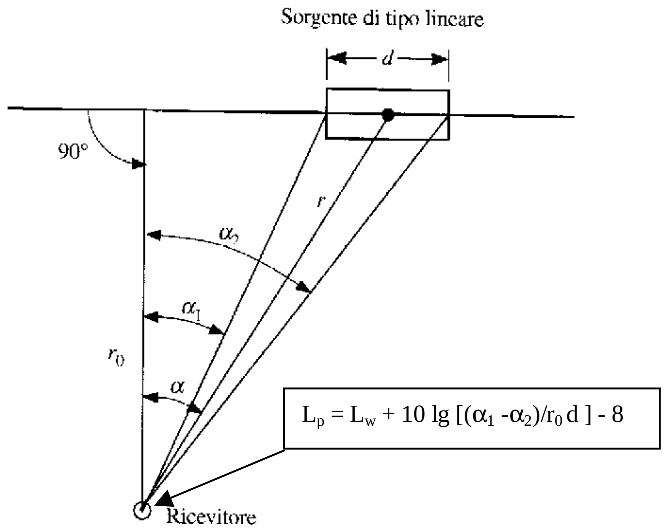

Figura 13: Posizione rispetto al ricevitore di una sorgente lineare

ESERCITAZIONE

In campo emisferico, si calcoli il livello di pressione sonora ad una distanza di 10 m da una sorgente che emette con una potenza di 60 dB:

$L_p = L_w - 20 \lg r - 8 = 60 – 20 – 8 = 32$ dB

Calcolare poi il livello di pressione sonora a 20 m:

$L_p = L_w - 20 \lg r - 8 = 60 – 26 – 8 = 26$ dB

Si conferma pertanto che al raddoppio della distanza si ha una riduzione di 6 dB.
Inoltre, conoscendo il livello di pressione sonora Lp1 ad una distanza r_1 dalla sorgente possiamo calcolare il livello Lp2 alla distanza r_2 senza bisogno di conoscere la potenza sonora della sorgente stessa; ed infatti:

$Lp1 – Lp2 = 20 \lg r_2 – 20 \lg r_1 = 20 \lg r_2 / r_1$

Con riferimento all'esempio suddetto si ha:

$Lp_{20m} = Lp_{10m} – (20 \lg r_2 / r_1) = 32 – (20 \lg 20/10) = 32 - 6 = 26$ dB   c.v.d.

3.2 Effetti della direttività della sorgente

In generale le sorgenti emettono in modo diverso a seconda delle direzioni: si definisce pertanto un fattore di direttività Q dato dal rapporto tra l'intensità sonora I_θ nella direzione θ e l'intensità sonora I che avrebbe il campo acustico in quel punto se la sorgente fosse omnidirezionale:

$Q = I_\theta/I$

Si definisce inoltre *l'indice di direttività* $D_\theta = 10 \lg Q$ (dB).
Esempi tipici di sorgenti sonore dotate di un evidente indice di direttività sono i macchinari, le unità di trattamento dell'aria, le pompe di calore, i consensatori, i motori dei veicoli, ecc.
Dalle relazioni viste in precedenza, per campo libero, si ricava:

$$L_p = L_w - A_{div} + D_\theta \qquad (3.2.1)$$

In genere è sufficiente conoscere il valore di Q (o D_θ) sul piano verticale e orizzontale.
Il valore di Q dipende inoltre dalla frequenza ed aumenta in genere con essa.
Nella **figura 14** sono rappresentati i valori di Q per tipiche situazioni del campo sonoro: in campo emisferico, essendo Q = 2, l'indice di direzionalità vale 3 dB come evidenziato, a parità di condizioni, dalla differenza di 3 dB tra le relazioni (3.1.1) e (3.1.2).
Nella realtà il campo sonoro può essere modificato dalla presenza, oltre che di ostacoli, di superfici riflettenti quali il terreno, gli edifici, ecc.; inoltre a causa dei fenomeni dissipativi e di assorbimento con cui l'onda sonora viene a contatto (tipi di terreno), della velocità del vento e dei fenomeni meteorologici (pioggia, neve, nebbia, ecc.) la relazione (3.2.1) è raramente verificata, per cui si introduce un fattore di attenuazione A (dB) che tiene conto dei complessi fenomeni suddetti:

$$L_p = L_w - A_{div} + D_\theta - A \qquad (3.2.2)$$

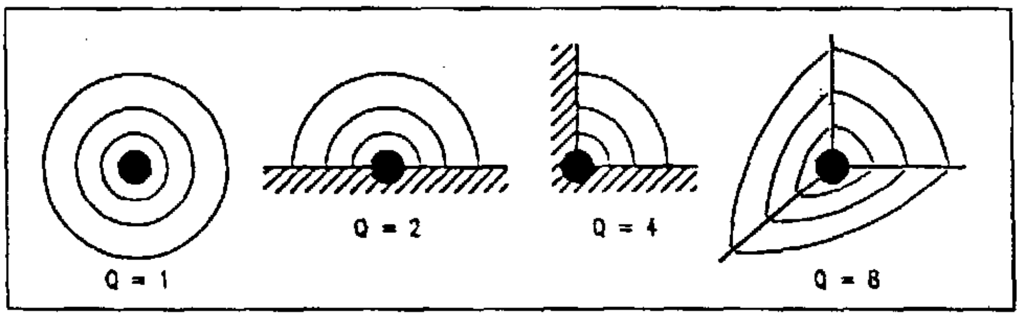

Figura 14: Valori della direttività Q in funzione del campo sonoro

4. ANALISI ACUSTICA E VARIABILITÀ DEL LIVELLO SONORO NEL TEMPO

Come accennato inizialmente i fenomeni acustici sono *fenomeni tipicamenti spettrali,* ovvero i loro effetti sono funzione della frequenza oltre che del contenuto energetico.
L'**analisi acustica** di un evento sonoro consiste quindi nel comprendere la distribuzione del contenuto energetico del suono alle varie frequenze interessate dall'evento stesso: ciò avviene rappresentando il suono in esame su un diagramma pressione/frequenza.
Tuttavia poiché la capacità selettiva dell'orecchio umano si manifesta non per ciascuna delle circa diciottomila frequenze udibili ma per gruppi di frequenze definite **bande critiche**[5] o bande d'ottava (mutuando tale denominazione dal campo musicale), l'analisi acustica viene condotta sulla base della conoscenza dei livelli globali (di potenza, intensità o pressione sonora) per ciascuna delle suddette bande, a partire dai livelli di spettro L_S per ciascuna delle frequenze comprese nella banda.

[5] L'analisi in frequenza viene fatta per bande di ottava o suddividendo le stesse in bande di terzi d'ottava; ovviamente la somma del contenuto energetico di tre bande di terzi di ottava eguaglia il contenuto energetico della corrispondente banda di ottava, con il vantaggio però di poter conoscere più in dettaglio la distribuzione energetica del suono; a livello normativo le analisi in frequenza vengono abitualmente prescritte in terzi d'ottava.

A parità di contenuto energetico globale del suono (L_P = cost), all'interno di ciascuna banda critica la sensazione sonora di intensità soggettiva rimane all'incirca costante comunque vari la frequenza o la larghezza di banda dei suoni.
Le correlazioni tra le frequenze di confine inferiore f_1 e superiore f_2, la frequenza centrale f_o e la larghezza di banda Δf sono le seguenti:

<u>per le bande d' ottava</u>

$\Delta f = f_2 - f_1 = 0{,}71\, f_o$; $f_2 = 2\, f_1$; $f_o = (f_1\, f_2)^{1/2}$

<u>per le bande di terzi d'ottava</u>

$\Delta f = f_2 - f_1 = 0{,}23\, f_o$; $f_2 = 1{,}259\, f_1$; $f_o = (f_1\, f_2)^{1/2}$

Le frequenze centrali di banda di ottava (o di terzi di ottava) sono state normalizzate e sono riportate in **Tabella 3**. Risulta evidente che all'interno di una banda d'ottava sono contenuti, con le dovute approssimazioni, 3 terzi d'ottava: ad esempio a 250 Hz Δf/ottava = 177, mentre Δf/1/3ottava = 58 e pertanto 58 x 3 $\cong$ 177.
Per la definizione di livello di pressione sonora, si ha che il livello di pressione dello spettro L_{SP} sarà dato dalla seguente relazione:

$$L_{SP} = 10 \lg p^2/(p_0^2\, \Delta f) = L_P - 10 \lg \Delta f \qquad \text{(dB)}$$

per definizione tale valore è quindi il livello di pressione del suono contenuto in una banda di frequenze larga 1 Hz e centrata sulla frequenza in esame.
Ad esempio per la banda d'ottava di 250 Hz, Δf = 177,5 Hz, se L_P = 60 dB si avrà:

$$L_{SP} = 60 - 10 \lg 177{,}5 = 37{,}5 \quad \text{(dB)}$$

a parità di livello per la banda di 125 Hz, Δf = 88,75 e quindi:

$$L_{SP} = 60 - 10 \lg 88{,}75 = 40{,}5 \quad \text{(dB)}$$

per verifica:

$$L_P = 10 \lg \int_{f1}^{f2} (10^{L_{SP}/10})\, df = 10 \lg [(10^{L_{SP}/10})\,(f_2 - f_1)] = L_{SP} + 10 \lg \Delta f \quad \text{(c.v.d)}$$

bande	ottava			1/3 d'ottava		
	taglio inf.	centrale	taglio sup.	taglio inf.	centrale	taglio sup.
frequenza (Hz)				56.2	63	70.8
	44	63	88	70.8	80	89.1
				89.1	100	112
				112	125	141
	88	125	177	141	160	178
				178	200	224
				224	250	282
	177	250	355	282	315	355
				355	400	447
				447	500	562
	355	500	710	562	630	708
				708	800	891
				891	1000	1122
	710	1000	1420	1122	1250	1413
				1413	1600	1778
				1778	2000	2239
	1420	2000	2840	2239	2500	2818
				2818	3150	3548
				3548	4000	4467
	2840	4000	5680	4467	5000	5623
				5623	6300	7079
				7079	8000	8913
	5680	8000	11360	8913	10000	11220
				11220	12500	14130

Tabella 3: Principali frequenze normalizzate: bande di ottava e terzi di ottava

Per l'analisi acustica di un suono si utilizza pertanto un diagramma, denominato spettrogramma, dove in ordinata vengono riportati i livelli L_P in dB, mentre in ascissa si riportano le frequenze centrali di banda normalizzate (vedi figura 15).

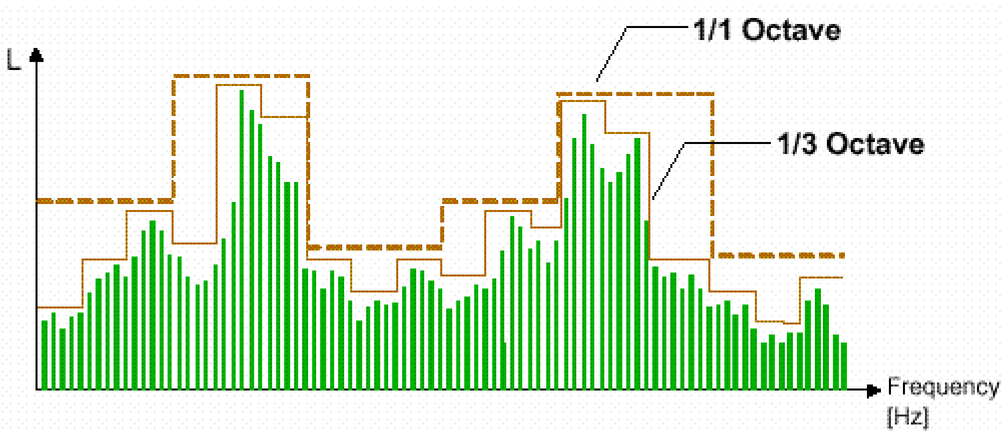

Figura 15: Diagramma spettrale o spettrogramma (confronto tra analisi in banda stretta, in bande di terzi di ottava e in bande di ottava).

Una volta conosciuti i suddetti livelli possiamo calcolare il <u>*livello globale del suono in esame*</u>, esprimendo così con un unico valore il contenuto energetico dell'evento sonoro.

Per il calcolo del livello globale si procede nel modo seguente:

- si calcola il rapporto $p^2 / p_0^2 = 10^{L_P/10}$ per ciascuna banda di frequenza centrale;
- si effettua la sommatoria dei valori così ottenuti: $\Sigma\, 10^{L_P/10}$
- si calcola infine il valore del livello globale L_P: $L_P = 10 \lg (\Sigma\, 10^{L_P/10})$

Tra gli spettri sonori di particolare interesse utilizzati per effettuare ad es. le prestazioni fonoisolanti di componenti edilizi sono da segnalare lo *spettro di rumore bianco* e lo *spettro di rumore rosa*: il primo è caratterizzato dall'avere un livello L_P costante e continuo per tutte le bande di frequenza; viceversa il secondo è caratterizzato dall'avere un *contenuto energetico costante* per tutte le bande di frequenza, ovvero si mantiene costante L_{SP} [6].

Finora si è supposto che il fenomeno in esame si mantenga costante durante la rilevazione, tuttavia generalmente le grandezze suddette variano con il tempo, in relazione alle caratteristiche della sorgente sonora; volendo quindi rappresentare un evento sonoro comunque variabile nel tempo T di integrazione con un unico valore del livello sonoro è stato definito il **Livello continuo equivalente di pressione sonora Leq**:

$$L_{eq} = 10 \lg [1/T \, (\int_0^T p^2_{(t)} / p_0^2 \, dt)] \qquad (dB) \tag{4.1}$$

Esso rappresenta pertanto un rumore comunque fluttuante mediante il livello di un rumore uniforme avente il medesimo contenuto energetico del rumore fluttuante (v. figura 16).

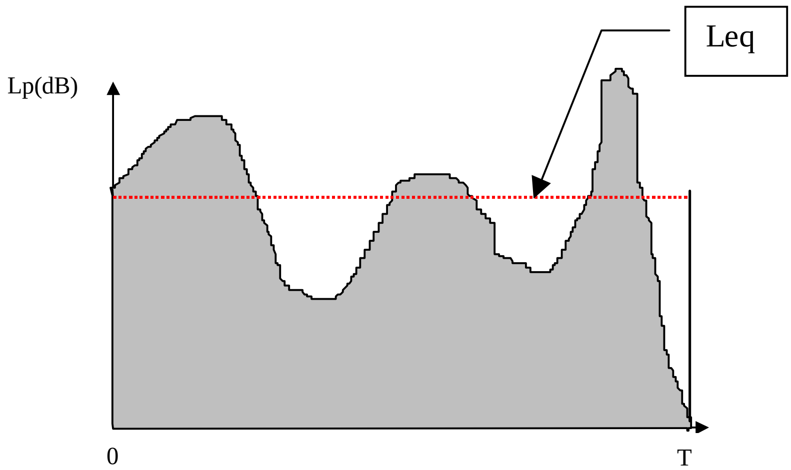

Figura 16: Rappresentazione grafica del livello continuo equivalente L_{eq} di un rumore comunque fluttuante nell'intervallo di tempo T

ESERCITAZIONE

Dato un evento sonoro con la seguente distribuzione in frequenza:

125 Hz → 50 dB
250 Hz → 30 dB
500 Hz → 60 dB

calcolare il livello sonoro complessivo mediante la procedura indicata in precedenza:
- calcolo del rapporto $p^2 / p_0^2 = 10^{L_P/10}$ per ciascuna banda: 10^5; 10^3; 10^6

[6] il rumore di una cascata d'acqua è un tipico *rumore bianco*; poiché il livello L_P si mantiene costante occorre che il livello di pressione dello spettro $L_{SP} = 10 \lg (p^2/p_0^2 \, \Delta f) = L_P - 10 \lg \Delta f$ diminuisca di 3 dB ad ogni raddoppio di frequenza; viceversa per il rumore rosa L_{SP} rimane costante quindi dovrà aumentare di 3 dB il valore di L_P ad ogni raddoppio di frequenza.

- si effettua la sommatoria dei valori ottenuti: $\Sigma\ (10^5 + 10^3 + 10^6) = 1{,}101 \cdot 10^6$
- si calcola infine il valore del livello globale $L_P = 10\ \lg\ (1{,}101 \cdot 10^6) = 60{,}4$ dB

Dato un evento sonoro caratterizzato della durata complessiva di 60 secondi con le seguenti variazioni di livello:

10 secondi → Lp = 50 dB
30 secondi → Lp = 30 dB
20 secondi → Lp = 60 dB

calcolare il livello sonoro equivalente inerente i suddetti livelli.
Dalla relazione:

$L_{eq} = 10\ \lg\ (\Sigma\ T_i \cdot 10^{L_{Pi}/10})/T = 10\ \lg\ [(10 \cdot 10^5 + 30 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^6)/60] = 55{,}4$ dB

Calcolare il L_{eq} nel caso che gli eventi suddetti abbiano tutti la stessa durata pari a 10 secondi.

$L_{eq} = 10\ \lg\ (\Sigma\ 10^{L_{Pi}/10})/n = 10\ \lg\ [(10^5 + 10^3 + 10^6)/3] = 55{,}6$ dB

Si ricorda che nei calcoli dei Livelli i valori vengono usualmente approssimati a ± 0,5 dB e interrotti alla prima cifra decimale: ad esempio i valori dei suddetti esempi pari a 60, 42 - 55,45 e 55,65 sono stati approssimati rispettivamente a 60,4 - 55,4 e 55,6 dB.

5. RICHIAMI DI ACUSTICA PSICOFISICA: GRANDEZZE PSICOACUSTICHE

La percezione dei suoni avviene per mezzo dell'orecchio, vero e proprio analizzatore acustico che converte le vibrazioni in messaggi codificati inviati al cervello, con un comportamento del tutto simile ad un convertitore analogico digitale. Il suono è percepito con caratteristiche psicosensoriali che possiamo riassumere nel tono, intensità di sensazione uditiva e nel timbro.
Come accennato il tono (altezza tonale) è legato alla frequenza (bassa frequenza = toni gravi, alta frequenza = toni acuti); esso nel caso dei rumori ha poca importanza poiché questi sono generalmente a banda larga. L'intensità di sensazione uditiva è invece legata al livello di pressione sonora ed alla composizione spettrale del suono. Infine il timbro è legato anch'esso alla composizione spettrale del suono, e si riferisce alla capacità dell'orecchio di distinguere suoni identici per intensità ed altezza ma emessi da sorgenti diverse: ad es. da strumenti musicali diversi, la voce dell'uomo da quella della donna, ecc.
Le grandezze fisiche finora illustrate sono atte a descrivere i vari fenomeni fisici che interessano l'acustica ambientale *ma non danno alcuna indicazione* in merito alla percezione soggettiva dei suoni, ed in particolare sulla **intensità soggettiva o sonia** che può essere attribuita ad un suono in una scala da debole a forte, né sugli effetti di **disturbo** delle sensazioni sonore. Analogamente a quanto avviene nel campo dell'illuminotecnica, dove il contenuto energetico di un fascio di onde elettromagnetiche non dà alcuna indicazione sulla sensazione luminosa che lo stesso produce una volta impressionata la retina, così nel campo dell'acustica il contenuto energetico di un evento sonoro, o meglio la distribuzione energetica del suono alle varie frequenze, non ci dà alcuna indicazione utile circa le sensazioni che tale energia provoca una volta che sia stimolato l'apparato uditivo umano.
La correlazione esistente tra le caratteristiche fisiche di un suono e la **sensazione di intensità soggettiva** dalle stesse provocate, considerata l'infinita possibilità di combinazioni sonore, è stata indagata solo per i suoni puri.

In un diagramma, frutto di ricerche su gruppi di individui dotati di udito normale (giurie sonore), definito "*audiogramma normale medio per toni puri*" si sono riportati in ascisse i livelli di pressione sonora in dB riferiti alla soglia di udibilità, ed in ordinata le varie frequenze in scala logaritmica (vedi **figura 17**).
La costruzione dell'audiogramma è stata fatta assumendo un suono puro a 1000 Hz di riferimento; al variare delle frequenze la giuria sonora giudica quando la *sonia* del suono in esame è uguale a quella del suono di riferimento individuando così una serie di punti aventi eguale sonia: l'unione dei punti così ottenuti individua delle curve definite **curve di isosensazione**. L'esame dell'audiogramma mostra come varia la sensibilità dell'orecchio al variare delle frequenze per i toni puri.
La valutazione numerica della sonia del suono in esame è rappresentato dal valore N espresso in **Phon** (o **livello di sensazione sonora** L_{SS}) cui corrisponde la stessa sensazione sonora prodotta dal livello di pressione sonora N in dB del suono di riferimento a 1000 Hz: ad esempio esaminando l'audiogramma si vede che un suono puro avente un livello di pressione sonora pari a 50 dB a 250 Hz produce la stessa sensazione di intensità soggettiva di un suono di 85 dB a 31,5 Hz; a loro volta entrambi i suoni hanno lo stesso livello di intensità soggettiva pari a 50 Phon (50 dB a 1000 Hz). Dall'esame dell'audiogramma si evince che la massima sensibilità dell'orecchio si ha nella zona compresa tra 1000 e 6000 Hz, ed in particolare decresce sensibilmente al decrescere della frequenza: tutto questo ha notevoli conseguenze pratiche nel campo dell'acustica edilizia ed ambientale e sul controllo del rumore in generale.

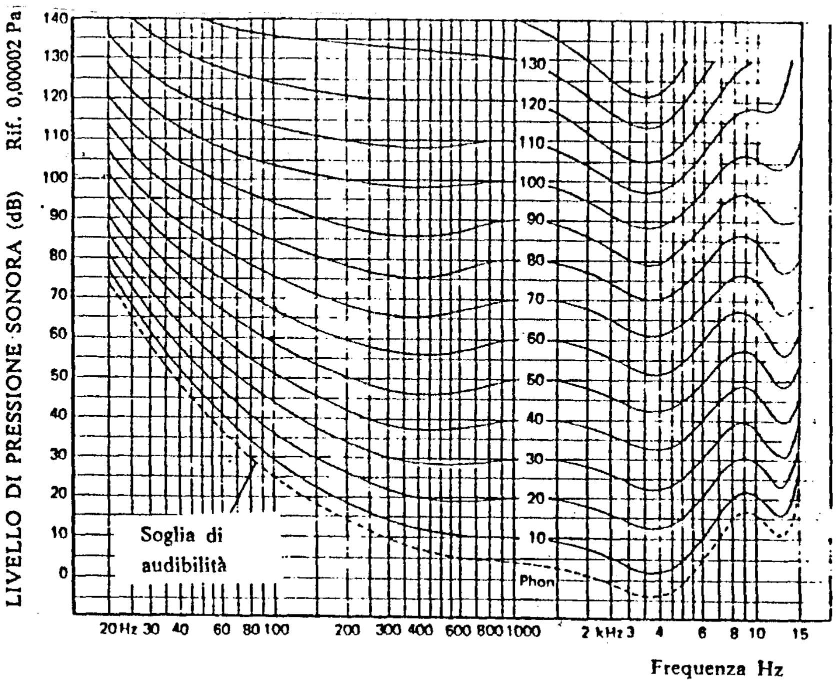

Figura 17: Audiogramma normale medio per toni puri

5.1 Livello sonoro in dB(A)

Le curve isofoniche rappresentano il comportamento medio di un orecchio normale e tuttavia il livello di isosonia non trova utilizzazione pratica, sia per le difficoltà di realizzare strumenti che siano in grado di dare di un suono qualsiasi il livello in PHON, sia perché tale livello non dà indicazioni attendibili sull'effetto di disturbo che il rumore provoca sugli individui.

Al fine suddetto sono state elaborate allora altre grandezze e tra queste quella di maggiore diffusione, soprattutto per la praticità di misurazione mediante un semplice fonometro, è quella del livello sonoro in dB (A).
Il livello di pressione sonora $L_{P(A)}$ in dB (A) è diventata la **grandezza psicoacustica base** per esprimere le risposte soggettive degli individui ai rumori.
Infatti da numerosi studi è emersa la fortuita nonché fortunata combinazione che i livelli sonori ottenuti con un fonometro utilizzante un *criterio di pesatura* "A" esprimono con molta buona approssimazione l'effetto simultaneo di sonia e di disturbo di rumori qualunque sia il loro livello di pressione sonora: tale criterio consiste nella correzione dei livelli energetici in funzione della sensibilità dell'orecchio alle varie frequenze.
Nella Tabella 4 sono riportati i fattori di correzione degli L_p per bande di ottava, secondo la curva di ponderazione A (v. figura 18), alle frequenze più significative. La curva A approssima l'andamento, in forma rovesciata, della curva di isosensazione a 40 phon: in tal modo i fattori di correzione penalizzano i contributi energetici alle basse frequenze, dove l'orecchio è meno sensibile, mentre lasciano invariato, o aumentano di poco, il contributo alle frequenze medio–alte.

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB	-26	-17	-8,6	-3	0	+1,2	+1	-1,1

Tabella 4: Fattori di correzione secondo la curva di ponderazione A

In prima approssimazione, e per rumori a banda non stretta[7], con spettro continuo privo di componenti tonali[8], è possibile stabilire la seguente relazione fra livello sonoro pesato "A" e Phon:

$L_{Phon} = L_{P(A)} + 13,5$ (Phon)

Mediante la pesatura dei suoni con la curva di ponderazione "A", codificata internazionalmente, si ottengono i livelli globali di pressione sonora in scala "A"; a partire dalla conoscenza dello spettro di un suono per bande di ottava, o terzi di ottava, la procedura è la seguente:

- si correggono i valori L_P delle varie bande secondo i fattori correttivi della curva "A" ottenendo i valori corretti $L_{P(A)}$ (v. fig.5.2);
- si trasformano i livelli $L_{P(A)}$ nei valori del rapporto $(p_A/p_0)^2 = 10^{L_{P(A)}/10}$
- si effettua la sommatoria $\Sigma\, (p_A/p_0)^2$
- si calcola il valore globale $L_{P(A)} = 10 \lg \Sigma\, (p_A/p_0)^2$

Il fonometro integratore, comunemente utilizzato per le misurazioni acustiche, effettua le operazioni suddette.
Tale strumento è inoltre in grado di effettuare l'integrazione dei valori istantanei $(p_A/p_0)^2$ nell'intervallo di tempo della misura: in tal modo si ottiene il valore della pressione sonora in dB (A) definito **Livello continuo equivalente ponderato in scala** "**A**", $Leq_{(A)}$:

$$L_{AeqT} = 10 \lg \left[1/T \int_0^T p^2_{A(t)}/p_0^2\, dt\right] \text{ dB (A)} \qquad (5.1.1)$$

[7] una *banda stretta* è una banda la cui larghezza è minore di un terzo d'ottava ma non minore dell'1% della frequenza centrale di banda.
[8] La presenza di componenti tonali in un suono è rivelata dal fatto che il livello di pressione sonora ad una certa banda supera sensibilmente il livello sonoro di entrambe le bande adiacenti: per bande di terzi d'ottava il superamento deve essere di almeno 5 dB.

Esso è pertanto analogo al valore L_{eq} ottenuto con la (4.1) solo che in questo caso i livelli sono *pesati* con la curva di ponderazione "A". Tale parametro è estremamente importante, in quanto è normalmente adottato per la misura del rumore al fine di quantificarne l'effetto di danno o disturbo che può arrecare: è stato infatti accertato che la risposta soggettiva al suono degli individui è correlata, oltre che al contenuto energetico del segnale sonoro ed alla sua distribuzione in frequenza, pesata secondo la curva A, anche alla sua distribuzione temporale ovvero alla sua durata.
La validità di tale assunto è noto come "**principio di uguale energia**".
Il parametro $Leq_{(A)}$ consente dunque di esprimere *con un unico numero indice* la qualità e quantità del rumore ambientale, rilevabile in modo semplice ed obiettivo con un fonometro.

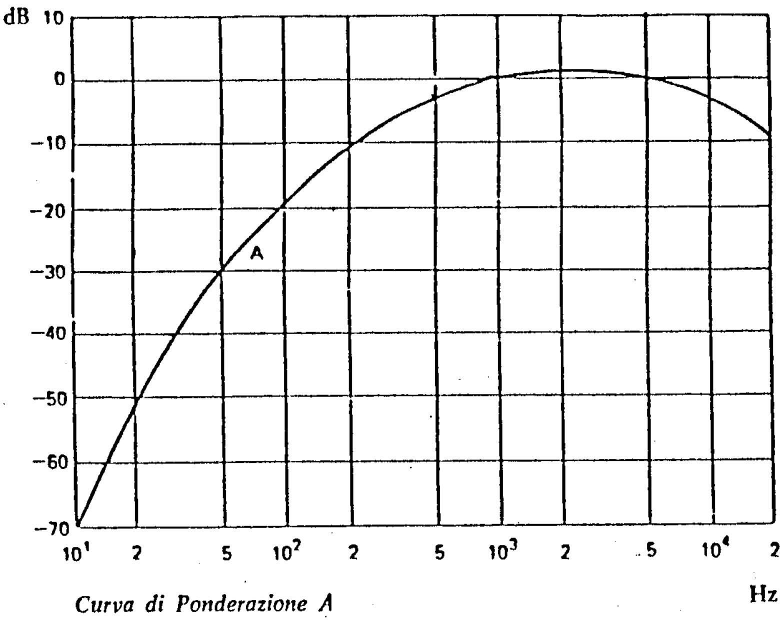

Figura 18: Curva di ponderazione A

Altre circostanze, dovute alla composizione del rumore, possono aumentarne l'effetto di disturbo; queste sono sostanzialmente dovute alla presenza di componenti tonali o impulsive[9]: nella normativa attuale la presenza di tali componenti provoca una penalizzazione del livello di rumore $Leq_{(A)}$ mediante l'aumento dello stesso di 3 dB(A) e, nel caso di compresenza delle suddette componenti, di 6 dB(A).
Dal punto di vista temporale si considera inoltre più disturbante il rumore che si manifesta nel periodo notturno (dalle ore 22 alle 6) rispetto a quello diurno (dalle ore 6 alle 22).

ESERCITAZIONE

[9] La presenza di componenti tonali in un suono è rivelata dal fatto che il livello di pressione sonora ad una certa banda supera sensibilmente il livello sonoro di entrambe le bande adiacenti: per bande di terzi d'ottava il superamento deve essere di almeno 5 dB; la presenza di componenti impulsive, ovvero di livelli elevati per tempi inferiori al secondo, si effettua misurando il livello massimo del rumore con costante di tempo di integrazione "slow" ed "impulse": se la differenza tra le suddette misurazioni supera i 5 dB, viene riconosciuta la presenza di componenti impulsive.

Dato un evento sonoro Lp = 60,4 dB con la seguente distribuzione in frequenza:

125 Hz → 50 dB
250 Hz → 30 dB
500 Hz → 60 dB

calcolarne il valore in dBA.
Con riferimento alla Tabella 5.1.1. la ponderazione dei livelli risulta la seguente:

125 Hz → 50 dB - 17 dB = 33 dBA
250 Hz → 30 dB - 8,6 dB = 21,4 dBA
500 Hz → 60 dB - 3 dB = 57 dBA

pertanto con la consueta procedura:

- calcolo del rapporto $p^2 / p_0^2 = 10^{L_{P(A)}/10}$ per ciascuna banda: $10^{3,3;} 10^{2,14;} 10^{5,7}$
- si effettua la sommatoria dei valori ottenuti: $\Sigma\ (10^{3,3} + 10^{2,14} + 10^{5,7}) = 5{,}033 \cdot 10^5$
- si calcola infine il valore del livello globale $L_{P(A)} = 10 \lg (5{,}033 \cdot 10^5) = 57$ dBA

come accennato in precedenti esercitazioni, si evidenzia che il contributo energetico di livelli che si differenziano per oltre 10 dB può ritenersi trascurabile ed infatti il livello complessivo in dBA poteva calcolarsi direttamente facendo riferimento al valore corretto di 500 Hz = 57 dBA.

Testi per evntuali approfondimenti

- G. Cellai, S. Secchi, Fondamenti di acustica, CLU editore (disponibile presso la libreria CLU, via San Gallo, Firenze);
- M. Garai, S. Secchi, G. Semprini, "Isolamento acustico degli edifici", Maggioli editore, 2000;