

ACUSTICA APPLICATA – Lezione Introduttiva

L'**acustica** è una disciplina scientifica che si occupa delle caratteristiche dei suoni, cioè studia come gli effetti sonori si producono e si propagano.

IL SUONO

Il **suono** è un fenomeno fisico che stimola il senso dell'udito: esso è provocato dal rapido movimento (vibrazione) di un qualsiasi corpo (una corda, un elastico, un pezzo di legno, una colonna d'aria, ecc.).

I suoni sono onde create da vibrazioni ottenute in migliaia di modi diversi, che generano una **variazione di pressione** che si propaga all'interno di un mezzo materiale senza trasporto di materia, (ad es. nel vuoto non c'è suono).

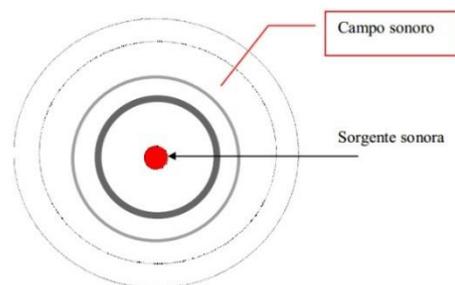
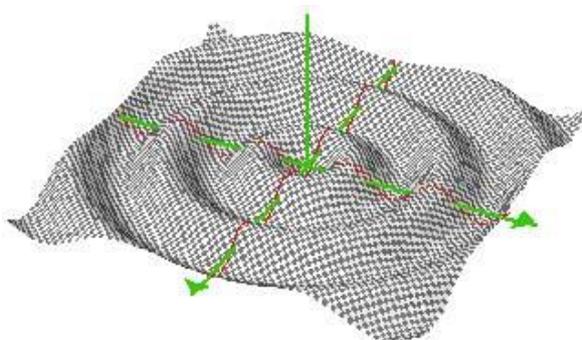
Propagazione del suono

Il suono è un fenomeno fisico, non un oggetto. Per esistere ha bisogno di una **SORGENTE**, cioè di un **corpo vibrante** e di un **MEZZO ELASTICO** di propagazione in cui le onde possano viaggiare. Aria, acqua, legno, metalli, cemento, mattoni e vetro possono vibrare e propagare le onde sonore.

Abbiamo quindi un primo dato di fatto: **all'origine del suono c'è un corpo vibrante.**

Vibrando, questo corpo trasmette le proprie vibrazioni al mezzo che lo circonda (nel nostro caso, l'aria). L'energia sonora, quindi, è una energia meccanica che, partendo dalla sorgente, si irradia sotto forma di onde attraverso il mezzo di propagazione fino all'ascoltatore.

Il suono è energia che si propaga sotto forma di onda meccanica



Sorgente Sonora e il suo modello:

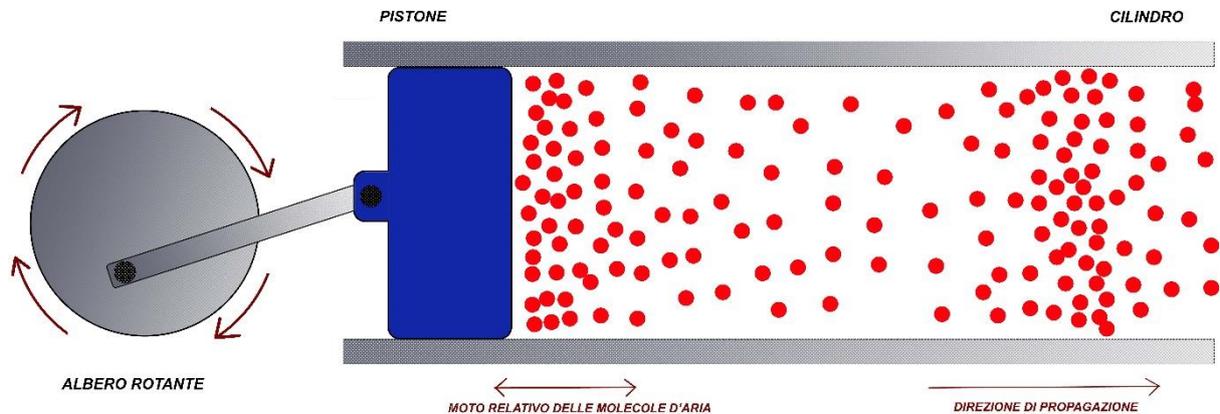


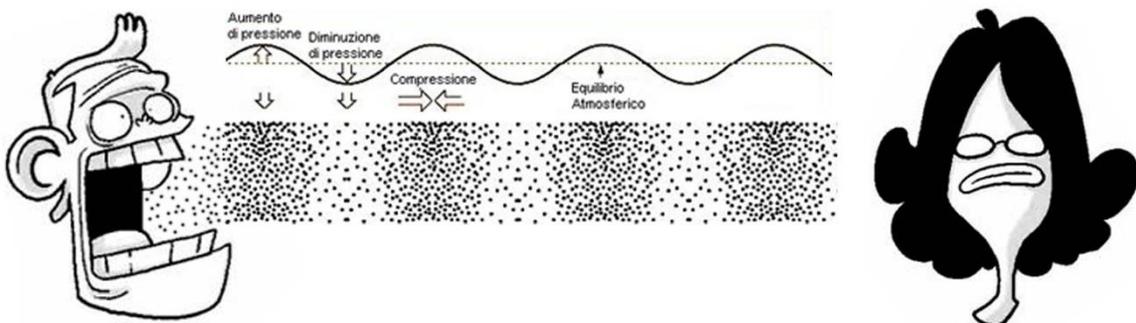
Fig.3 Particelle all'interno di un mezzo elastico

Per comprendere l'origine fisica del suono consideriamo un pistone che oscilla periodicamente grazie ad un albero rotante; il rapido succedersi di compressioni ed espansioni genera un movimento delle particelle del mezzo elastico: le particelle mosse dal pistone provocano, grazie a una reazione a catena, il movimento delle particelle contigue che generano onde meccaniche di tipo longitudinale.

Mentre le singole particelle oscillano continuamente attorno alla loro posizione iniziale (moto locale, particle velocity) l'onda generata si muove a velocità costante (moto d'insieme – sound speed).

La “sound speed” della suddetta onda è una costante fisica, detta c_0 , e dipende solo dal mezzo elastico attraverso il quale si propaga.

Il moto delle particelle genera l'onda, ed il suono si propaga sotto forma di Onda sonora!



Le onde sonore prodotte provocano dei movimenti periodici delle molecole d'aria formando strati alternati di aria compressa e rarefatta che si propagano in tutte le direzioni fino ad arrivare al nostro orecchio; lo stesso accade quando si parla, poiché si sposta una quantità finita di aria

GRANDEZZE FISICHE DEL SUONO

- **Sensazione di "altezza" del suono (grave o acuto)**
 - Frequenza (f)
 - Periodo (T)
 - Pulsazione o velocità angolare (ω)
- **Sensazione di "intensità" del suono (forte o debole)**
 - Ampiezza dell'onda di pressione (p)
 - Ampiezza dell'onda di "particle velocity" (v)

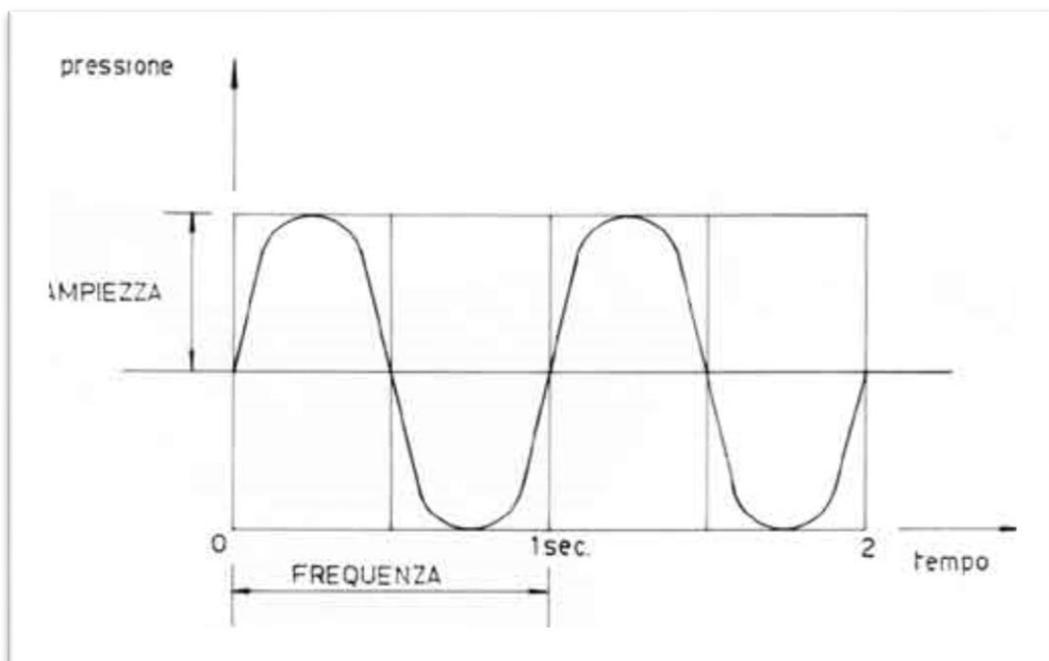
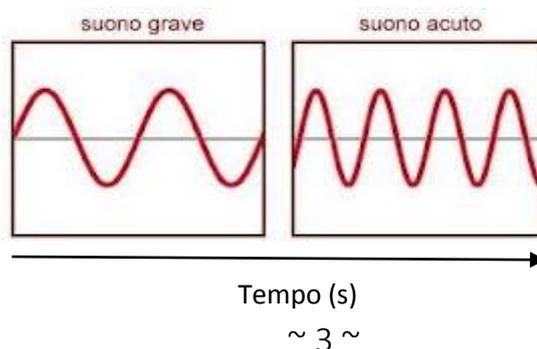


Fig.4 Grandezze dell'onda

Frequenza:

L'altezza percepita dei suoni dipende dalla **frequenza (f)**, cioè dal numero delle oscillazioni che si verificano in un dato tempo (un secondo), quanto più numerose esse sono, tanto più acuto è il suono.



La frequenza si misura in “Hertz” [Hz], il termine Hertz si riferisce al nome del fisico tedesco che per primo studiò questi fenomeni.

Un Hertz corrisponde ad un'oscillazione completa nel tempo di un secondo.

Dire che un suono è di 300 Hz significa che il corpo che lo produce vibra 300 volte al secondo.

In natura esistono suoni che vanno da un minimo di 1 Hz a un massimo di circa 1.000.000 Hz. L'orecchio umano può solo sentire i suoni compresi tra 16 e 20.000 Hz.

I suoni di frequenza inferiore ai 16 Hz vengono chiamati infrasuoni; quelli superiori ai 20.000 Hz vengono chiamati ultrasuoni. Molti animali sono in grado di udire questi tipi di suono, perché dotati di un udito con campo di frequenza più esteso di quello umano.

PERIODO (T): Si definisce periodo il tempo necessario per compiere un ciclo completo, anche definito come inverso della frequenza

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{Con} \quad f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{dove } \omega = \text{velocità angolare} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Ampiezza dell'Onda:

L'ampiezza delle fluttuazione della pressione sonora è la caratteristica che ci permette di distinguere i suoni forti da quelli deboli; in pratica quello che comunemente chiamiamo il “volume” del suono. In sostanza, l'orecchio umano è sostanzialmente un sensore di pressione.

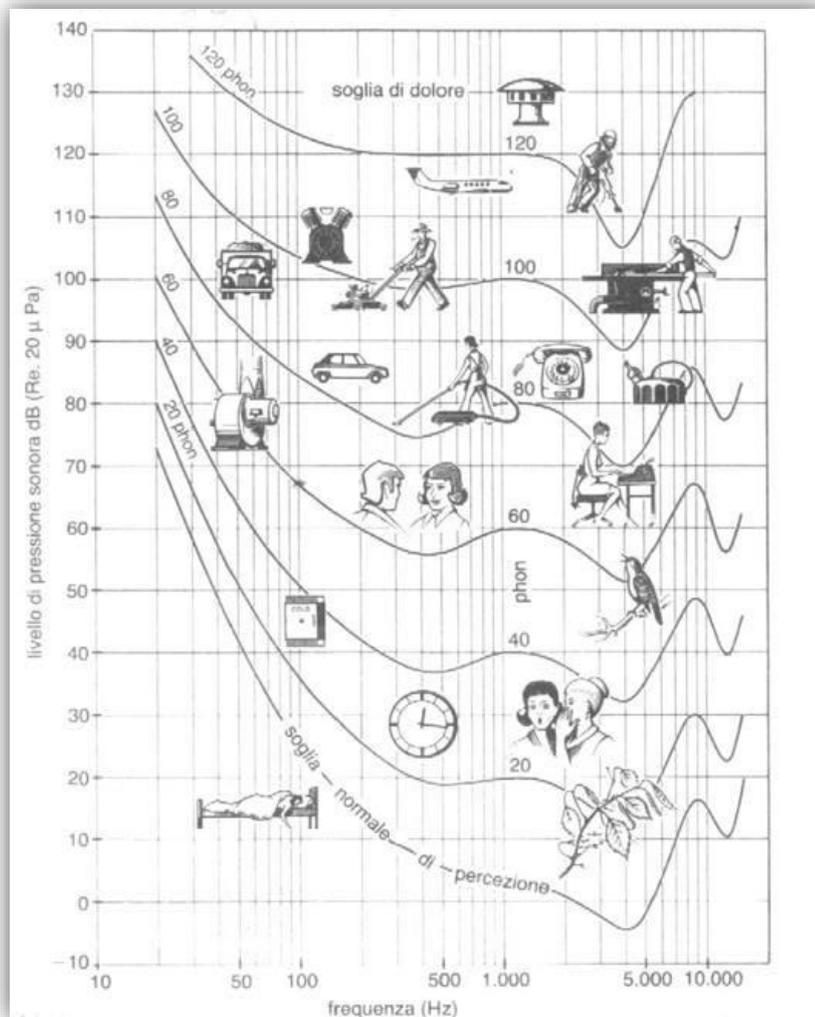
Normalmente però non si utilizza l'ampiezza della fluttuazione di pressione sonora espressa in Pa per misurare la sensazione sonora percepita dall'uomo, si usa invece convertire tale valore di pressione sonora nella scala logaritmica dei dB (decibel), definendo così il **Livello di Pressione Sonora (SPL, Sound Pressure Level)**

La pressione acustica necessaria perché un suono sia udibile dall'orecchio umano varia a seconda della frequenza dei suoni.

Un suono di 1.000 Hz è udibile a “0 dB”, mentre scendendo a 30 Hz occorre un livello di pressione sonora di almeno 60 dB perché il suono sia udibile.

La soglia del dolore (fissata a circa 120 dB) è quella soglia oltre la quale si prova un forte dolore.

L'esposizione prolungata a livelli di pressione sonora superiori agli 85 dB può causare forti disturbi o addirittura sordità permanente.



GRANDEZZE CINEMATICHE DEL SUONO

- **Spostamento:**

$$s(t) = s_0 \cos(\omega t) \quad \text{oppure} \quad s(t) = s_0 \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

Con s_0 si intende il valore dello spostamento massimo della superficie vibrante, determinata dalla corsa del pistone che va avanti ed indietro.

- **Velocità delle particelle v:**

$$\vec{v} = \frac{ds}{dt} = -\omega \cdot s_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

La velocità delle particelle \vec{v} , essendo un vettore, permette agli animali aventi organi predisposti, come l'uomo, di percepire da quale direzione proviene il suono.

- **Velocità del suono c_0 :**

La velocità delle particelle v (particle velocity) non va confusa con la **velocità del suono** (sound speed) c_0 .

Definiamo la **velocità di propagazione** dell'onda c_0 come

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot r \cdot T}$$

- coefficiente di dilatazione adiabatica $\gamma = c_p/c_v = 1,41$

- costante universale dell'aria $R = 287 \text{ [J/kg K]}$

- temperatura assoluta $T = 273 + t \text{ [K]}$

Approssimativamente si può anche scrivere $c_0 = 331.4 + 0.6 \cdot t \approx 340 \text{ [m/s]}$ allorché le temperature siano comprese tra i 5 e i 25°C

Le proprietà elastiche del mezzo determinano la velocità del suono e quindi anche la **lunghezza d'onda** (λ); essa è la distanza che separa i due massimi, ossia si rileva da picco a picco, di una onda sinusoidale "fotografata" nel suo sviluppo spaziale in un certo istante.

Può essere calcolata come $\lambda = \frac{c_0}{f}$ (3)

Frequenza e lunghezza d'onda hanno un rapporto di inversa proporzionalità: all'aumentare di f la lunghezza d'onda λ diminuisce.

Accelerazione:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 s_0 \cos(\omega t) \quad (4)$$

L'accelerazione è poco usata, in quanto solitamente si preferisce usare la velocità delle particelle come grandezza cinematica,

GRANDEZZE FISICHE

Si definiscono **Grandezze di Campo**:

- **Pressione Sonora** $p = [\text{Pa}]$
- **Velocità di particelle** $\vec{v} = [\text{m/s}]$

Queste grandezze sono quelle realmente percepibili dal sistema uditivo umano, esse variano in ogni punto del campo. Solo in ambienti molto piccoli è possibile effettuare una simulazione numerica, con tecnica FEM (finite elements) o BEM (boundary elements), in grado di prevedere numericamente il valore di pressione e velocità in ciascun punto del campo.

In ambienti più grandi si deve rinunciare al calcolo deterministico delle grandezze di campo, e ci si deve accontentare di un calcolo “statistico” delle sole grandezze energetiche, che risulta fattibile anche per ambienti molto vasti, o all’aperto..

Si definiscono **Grandezze Energetiche**:

- **Densità di energia sonora** $D = [\text{J/m}^3]$
- **Intensità Sonora** $\vec{I} = [\text{W/m}^2]$
- **Potenza Sonora** $W = [\text{W}]$ quantifica la potenza sonora della sorgente

Per definire completamente la situazione acustica in un punto conoscere sempre una grandezza vettoriale ed una scalare, (ad esempio la pressione p ed il vettore velocità \vec{v} , oppure la densità di energia D ed il vettore Intensità Sonora \vec{I}).

Tutte le suddette grandezze possono essere espresse in **DECIBEL (dB)**; la scala dei decibel è una scala logaritmica utilizzata per compattare il grande range di valori delle grandezze energetiche percepiti dall’essere umano, più precisamente il decibel è 10 volte il logaritmo decimale del rapporto tra il valore energetico in esame e il valore energetico di riferimento.

Allorchè “si mettono in dB” i valori delle grandezze di campo p e v , giacchè esse non sono di per se grandezze energetiche, gli stessi vengono elevati al quadrato, in modo da ottenere un qualcosa che è proporzionale, rispettivamente, all’energia potenziale di pressione ed all’energia cinetica.

LIVELLI SONORI

- **Livello di Pressione Sonora:** (è quello più vicino alla percezione umana, può essere vista come l'Energia Potenziale di Pressione)

$$L_p = 10 \log \frac{p_{eff}^2}{p_{rif}^2} = 20 \log \left(\frac{p_{eff}}{p_{rif}} \right) \text{ [dB]} \quad \text{con } p_{rif} = 20 \mu\text{Pa} \quad (5)$$

- **Livello di Velocità delle Particelle:** (può essere vista come l'Energia Cinetica)

$$L_v = 10 \log \frac{v_{eff}^2}{v_{rif}^2} = 20 \log \left(\frac{v_{eff}}{v_{rif}} \right) \text{ [dB]} \quad \text{con } v_{rif} = 50 \text{ nm/s} \quad (6)$$

- **Livello di Intensità Sonora:** (misura la sola Energia che si propaga)

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{rif}} \text{ [dB]} \quad \text{con } I_{rif} = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

- **Livello di Densità Sonora:** (misura tutta l'Energia, sia quella che si propaga, sia quella che non si propaga)

$$L_D = 10 \log \frac{D}{D_{rif}} \text{ [dB]} \quad \text{con } D_{rif} = 3 \times 10^{-15} \text{ J/m}^3 \quad (8)$$

$L_D > L_I$ poiché c'è sempre una quota di energia che non si propaga,
ed L_D è il valore medio energetico fra L_p ed L_v

Esiste un unico caso in cui tutti i livelli sonori in dB sono uguali, cioè il caso di onda piana e progressiva, esempio pistone-tubo a sezione costante (fig.3).

$$L_p = L_v = L_I = L_D$$

DENSITA' DI ENERGIA Contenuta nel mezzo elastico:

Riprendiamo in esame una sorgente sonora costituita da un pistone che si muove di moto armonico (fig.3).

La propagazione del suono avviene in tal caso per onde piane e si può dimostrare che la **Densità di energia sonora (D)** trasferita dalla sorgente (il pistone) al mezzo è data dalla seguente relazione:

$$D = \frac{E}{V} = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot v_{eff}^2 + \frac{1}{2} p_{eff}^2 / (\rho \cdot c_0^2) \quad (9)$$

In tale relazione appaiono separatamente i termini che rappresentano la densità dell'energia cinetica e la densità dell'energia potenziale di pressione.

Questa espressione è in realtà vera in generale, per un campo sonoro non necessariamente piano e progressivo, e per una forma d'onda arbitraria, non necessariamente sinusoidale, a patto di valutare il valore medio energetico nel tempo (valore "efficace", detto anche valore RMS) di pressione sonora e particle velocity con le espressioni:

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

Giacché da tali due valori efficaci discendono le definizioni rispettivamente del livello di pressione sonora L_p e del livello di velocità delle particelle L_v , ben si comprende come il livello di densità sonora L_D possa venire ricavato, in generale, come valore medio energetico fra i due livelli di pressione sonora e di velocità delle particelle.

INTENSITA' SONORA che si propaga attraverso una superficie:

L'Intensità Sonora rappresenta la Potenza (energia in un secondo) che attraversa una superficie di 1 m².

L'intensità istantanea $I(t)$ è data semplicemente dal prodotto fra pressione sonora e velocità delle particelle, ed è pertanto un vettore che ha la stessa orientazione del vettore velocità:

$$\vec{I}(t) = \vec{v}(t) \cdot p(t)$$

Trattandosi di una grandezza energetica, è poi sufficiente operare una normale media aritmetica dei suoi valori nel tempo, per ricavare il vettore intensità sonora media:

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \vec{I}(t) \cdot dt$$

Per una onda piana e progressiva, che si propaga con velocità del suono c_0 , si può scrivere:

$$I = D \cdot c$$

- **Livello di Potenza Sonora:** (misura quanta Energia sonora viene emessa in un secondo da una sorgente)

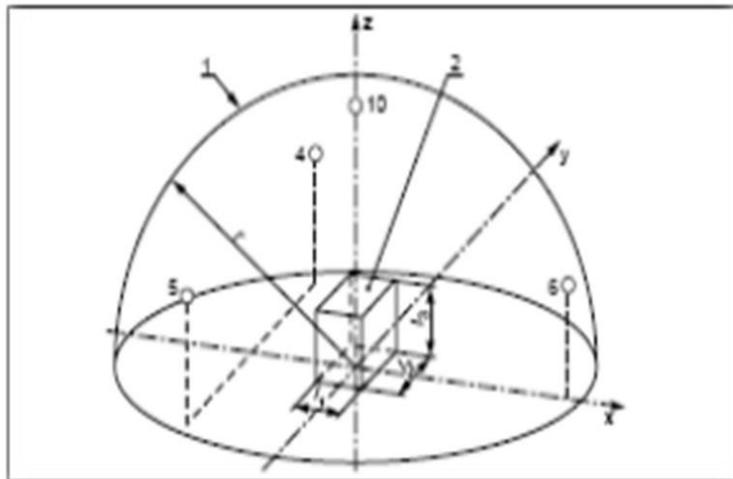
$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{\text{rif}}} \text{ [dB]} \quad \text{con } W_{\text{rif}} = 10^{-12} \text{ W} \quad (10)$$

LEGAME CAUSA-EFFETTO

Se consideriamo una superficie che circonda completamente una sorgente sonora, l'**Intensità Sonora** che la attraversa si calcola come

Intensità = Potenza / Superficie ; esprimendo ciò in dB si ha:

$$L_W = L_I + 10 \log (S) \quad \text{[dB]}$$



Pertanto per determinare il livello di potenza sonora di una sorgente si effettuano misure di intensità sonora media su una superficie che avvolge completamente la sorgente, e si opera poi il calcolo di L_W con la relazione suddetta.

Va osservato che allontanandosi dalla sorgente, cala il valore del livello di intensità sonora, ma il livello di potenza sonora della sorgente rimane invariato.

OPERAZIONI CON I DECIBEL

- **Somma Incoerente** – Somma due Livelli Sonori provenienti da fonti diverse
Si sommano le energie, quindi i valori di pressione sonora al quadrato

$$L_{p1} = 10 \log(p_1/p_{rif})^2 \quad (p_1/p_{rif})^2 = 10^{L_{p1}/10}$$

$$L_{p2} = 10 \log(p_2/p_{rif})^2 \quad (p_2/p_{rif})^2 = 10^{L_{p2}/10}$$

$$\implies (p_T/p_{rif})^2 = (p_1/p_{rif})^2 + (p_2/p_{rif})^2 = 10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}$$

$$L_{p,Tot} = "L_{p1} + L_{p2}" = 10 \log (p_T/p_{rif})^2 = 10 \log (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10}) \quad [dB]$$

Es. Supponiamo che nella stessa stanza ci siano due contributi sonori

- Somma di due Livelli Sonori di valore diverso:

$$L_{p1} = 80 \text{ dB} \quad L_{p2} = 85 \text{ dB}$$

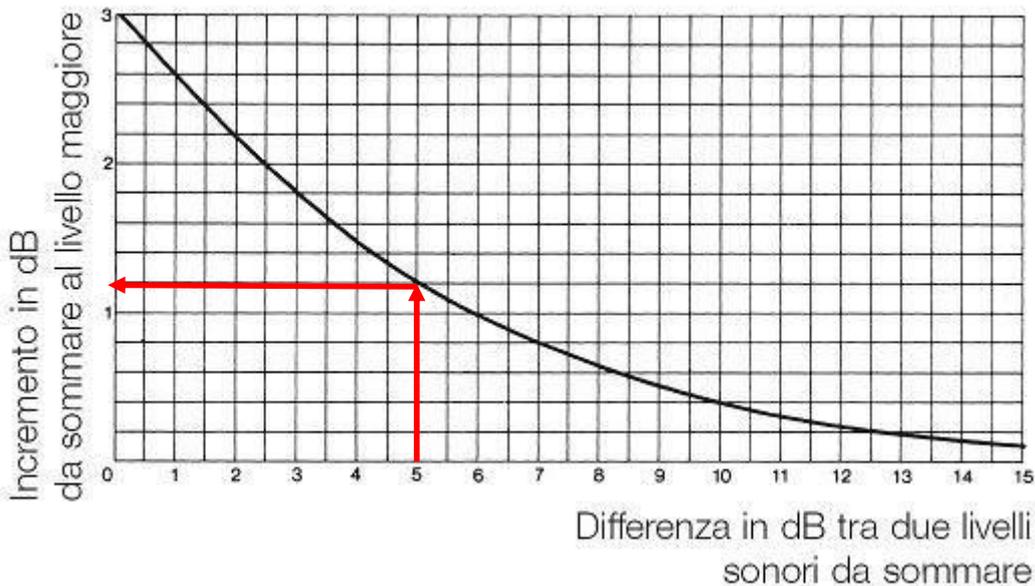
$$\implies L_{p,Tot} = 10 \log(10^{80/10} + 10^{85/10}) = 86,2 \text{ dB}$$

- Somma di due Livelli Sonori di pari valore:

$$L_{p1} = 80 \text{ dB} \quad L_{p2} = 80 \text{ dB}$$

$$\implies L_{p,Tot} = 10 \log(10^{80/10} + 10^{80/10}) = 80 + 10 \log 2 = 83 \text{ dB}$$

Altrimenti si può utilizzare il grafico per la soluzione:



\implies 1,2 dB sarà il valore da aggiungere a L_{p2} .

Se i suoni differiscono di più di 10 dB il livello più basso è trascurabile:

Es. EFFETTO DI MASCHERAMENTO

$$L_{p1} = 80 \text{ dB} \quad L_{p2} = 90 \text{ dB}$$

$$\implies L_T = 90 \text{ dB}$$

E' un metodo utilizzato quando con un "bel" suono forte si va a mascherare un "brutto" suono debole.

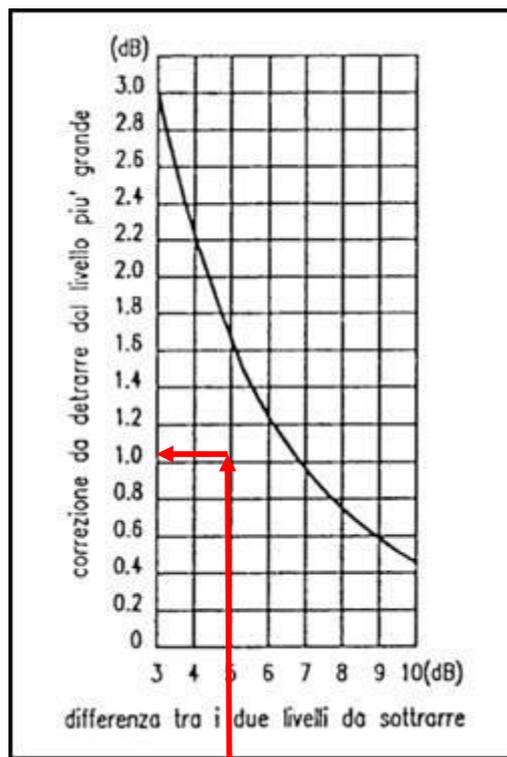
- **Differenza** – Differenza di due Livelli Sonori provenienti da fonti diverse

Es.

$$L_{p1} = 80 \text{ dB} \quad L_T = 85 \text{ dB} \quad L_{p2} = ??$$

$$\implies L_{p2} = 10 \log (10^{85/10} - 10^{80/10}) = 83,4 \text{ dB}$$

Altrimenti si può utilizzare il grafico per la soluzione:

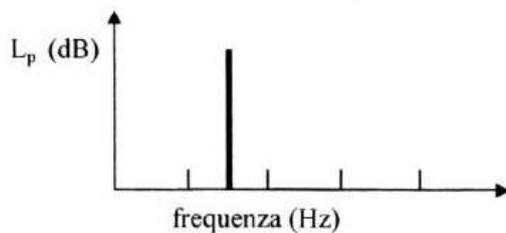


$$\implies 1,6 \text{ dB sar\`a il valore da sottrarre a } L_T.$$

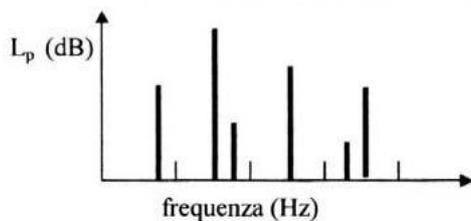
SPETTRO SONORO

Per analizzare la composizione in frequenza di un suono complesso si utilizza lo **Spettro Sonoro**, un grafico per l'analisi di un suono che riporta i **dB** in ordinata e la **frequenza (f)** in ascissa.

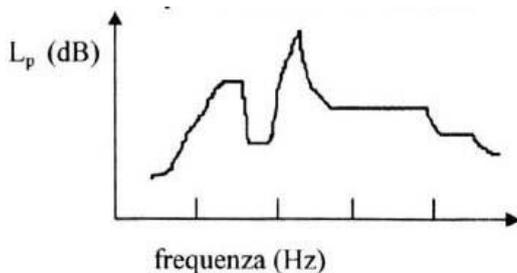
Ogni tipologia di suono genera uno spettro differente:



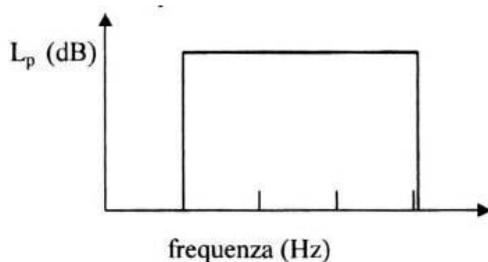
a) **TONO PURO**: è un suono semplice la cui rappresentazione spettrale è una semplice linea retta verticale;



b) **SUONO "COMPLESSO"**: definito anche **SUONO ARMONICO** (es. suono generato da uno strumento musicale);

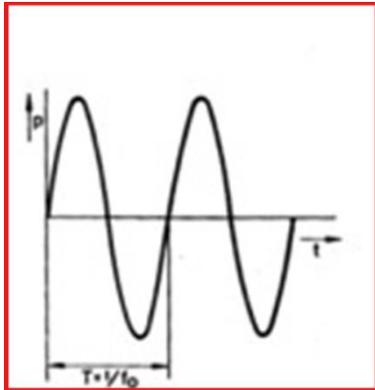


c) **SUONO "CONTINUO"**: (es. rombo di un'automobile) genera uno spettro omonimo;

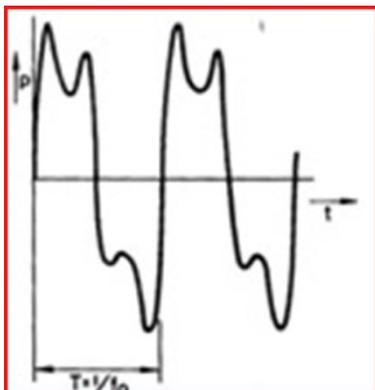


d) **"RUMORE BIANCO"**: è un rumore di livello costante in tutto lo spettro di frequenze; in altre parole le frequenze sono tutte allo stesso livello, dunque lo spettro generato è una semplice linea retta orizzontale.

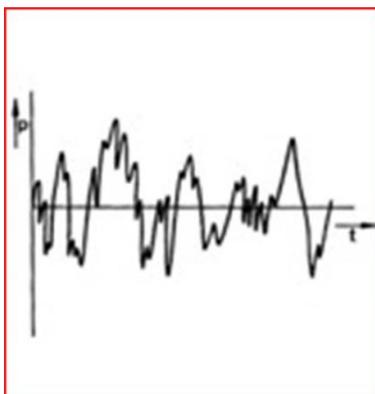
Ogni tipologia di suono genera una forma d'onda differente:



1) **ONDA SINUSOIDALE**: detta anche **TONO PURO**; il suo tracciato è regolare e, come il nome stesso indica, assume la forma di sinusoide (i picchi sono speculari alle valli).



2) **ONDA PERIODICA**: anche il suo tracciato è regolare in quanto la forma d'onda si ripete sempre identica, ma le curve hanno forma non sinusoidale (presentano delle irregolarità nelle curve). E' data dalla soma di più onde sinusoidali, a frequenze multiple della fondamentale (armoniche). Tipica del suono degli strumenti musicali.



3) **ONDA CASUALE**: detta anche **ONDA APERIODICA**, il suo tracciato è irregolare e zigzagante. Il suono è percepito come rumore, solitamente fastidioso.

ANALISI IN BANDE DI FREQUENZA

Nel caso di rumori "a banda larga"; non è possibile rappresentare lo spettro del suono con un ridotto numero di toni puri di opportuno livello.

Si ricorre, allora, alla analisi del segnale mediante un banco di filtri passa-banda, ciascuno dei quali consente di determinare il livello sonoro all'interno di una "**BANDA DI FREQUENZA**". Ciascuna banda è caratterizzata da una **frequenza di taglio superiore (f_s)** e una **frequenza di taglio inferiore (f_i)**.

L'analisi in bande di frequenza può essere di due tipi:

- Analisi a BANDA COSTANTE (detta anche A BANDA STRETTA);
- Analisi a BANDA PERCENTUALE COSTANTE da 1/1 o 1/3 di ottava.

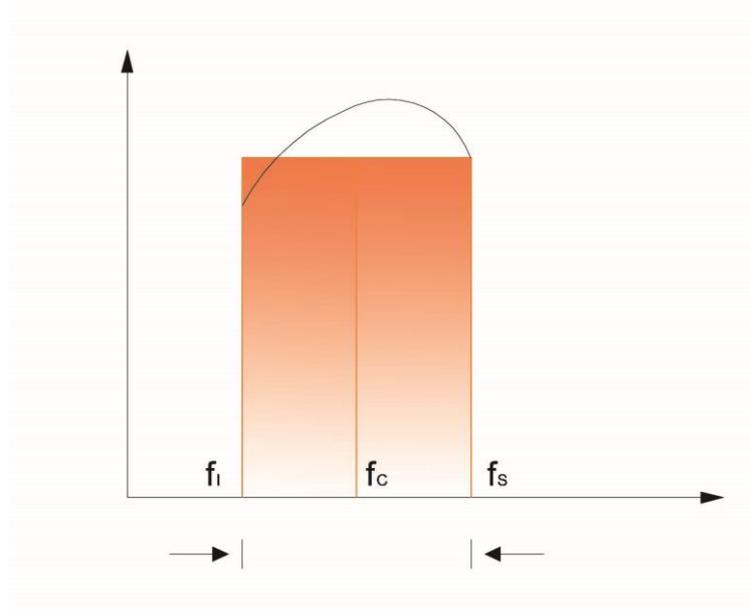
Analisi a BANDA COSTANTE

Attraverso questo tipo di analisi si ottiene uno spettro a bande tutte uguali in quanto la differenza (Δf) tra la frequenza di taglio superiore e quella di taglio inferiore risulta sempre costante, dunque:

$$\Delta f = f_s - f_i = \text{COSTANTE}$$

Tale analisi viene ottenuta tramite un'elaborazione matematica detta **FFT (Fast Fourier Transform)**.

Analisi a BANDA PERCENTUALE COSTANTE



E' l'analisi più utilizzata perché più vicina alle nostre capacità uditive rispetto all'analisi a banda costante.

Si pone:

f_i : frequenza di taglio inferiore;

f_s : frequenza di taglio superiore;

f_c : frequenza nominale centrale di banda

$$\text{dove } f_c = \sqrt{f_i \cdot f_s} \quad (11)$$

Δf : ampiezza di banda;

$\frac{\Delta f}{f_c}$ = ampiezza percentuale di banda;

Operiamo una distinzione:

BANDA 1/1 DI OTTAVA

Ponendo $f_s = 2 \cdot f_i$ possiamo calcolare l'ampiezza percentuale di banda:

$$f_c = \sqrt{2 \cdot f_i^2} = \sqrt{2} \cdot f_i \implies \Delta f = 2f_i - f_i = f_i \implies \frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_i}{\sqrt{2} \cdot f_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$$

L'ampiezza di ogni banda è dunque pari al 70,7% della frequenza nominale centrale della banda.

BANDA 1/3 DI OTTAVA

Ponendo $f_s = \sqrt[3]{2} \cdot f_i$ calcoliamo:

$$f_c = \sqrt{f_i \cdot f_s} = \sqrt{f_i \cdot 2^{1/3} \cdot f_i} = f_i \sqrt{2^{1/3}} = f_i \sqrt[6]{2}$$

$$\Delta f = \sqrt[3]{2} \cdot f_i - f_i = f_i \cdot (\sqrt[3]{2} - 1) \implies \frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_i \cdot (\sqrt[3]{2} - 1)}{f_i \sqrt[6]{2}} = \frac{-1 + \sqrt[3]{2}}{\sqrt[6]{2}} = 0,232$$

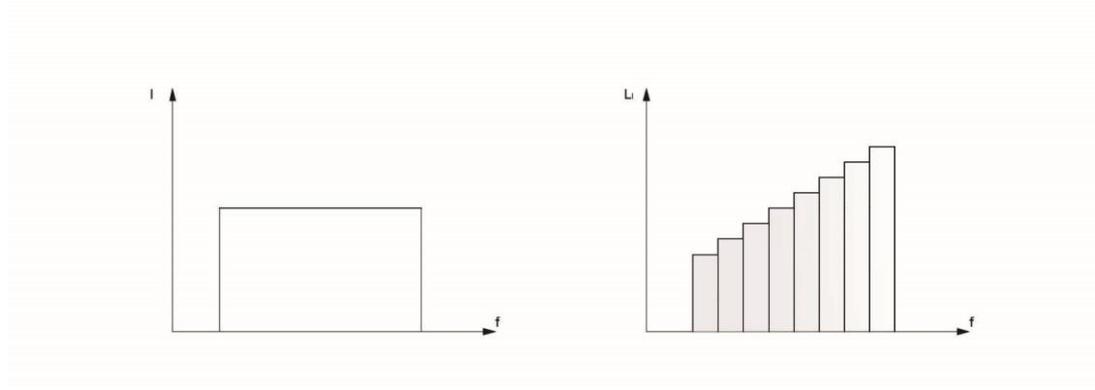
L'ampiezza di ogni banda è uguale al 23,3% della frequenza nominale centrale di ogni banda.

Per bande ad n-esimi di ottava vale la relazione:

$$f_s = \sqrt[n]{2} \cdot f_i \quad (11)$$

RUMORE BIANCO E RUMORE ROSA

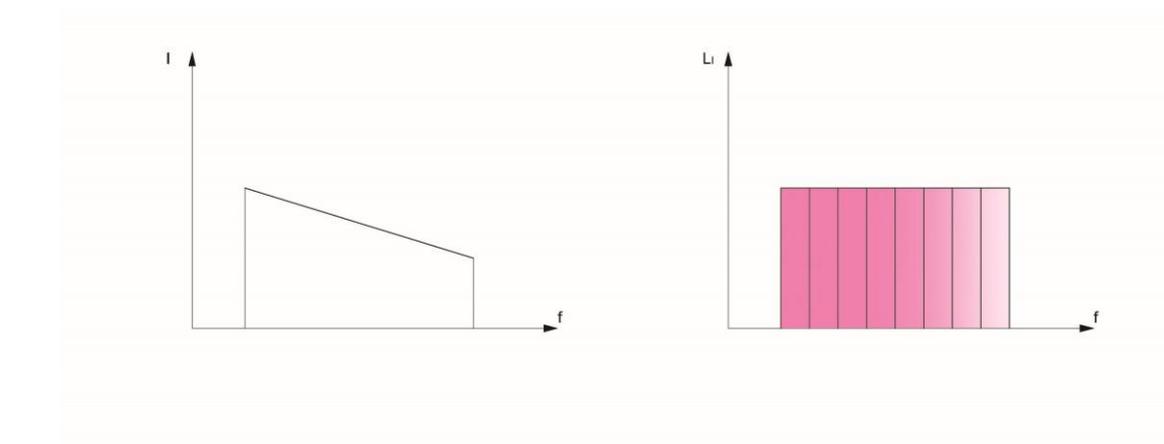
Il rumore bianco è piatto in un'analisi in banda stretta, mentre è crescente per l'analisi in 1/3 di ottava.



Rumore Bianco

In particolare, giacché ogni banda d'ottava ha ampiezza doppia della banda precedente, l'incremento che si verifica è di 3dB/ottava, in quanto 3dB significano un raddoppio dell'energia.

E' stato definito, perciò, un nuovo rumore: **RUMORE ROSA**; un particolare tipo di rumore in cui le componenti a bassa frequenza hanno livello maggiore, a differenza del rumore bianco in cui il livello sonoro è uguale per qualsiasi frequenza. Ha un andamento costante e piatto nell'analisi in ottave o 1/3 di ottava, al contrario è decrescente per l'analisi FFT, ovviamente con pendenza negativa di -3 dB/ottava.



Rumore Rosa