ACUSTICA I

LEZIONE 1: 22/10/2010

Acustica I 6 c.f.u.
Laboratorio Acustica 6 c.f.u. Tecnico competente in acustica
Acustica II 6 c.f.u.
Tirocinio

Acustica → Suono
Acustica → rumore → danno (irreversibile)
rumore → disturbo (effetti reversibili ma misurabili) → oggettivi
rumore → annoyance (fastidio) → soggettivo

Libro di testo: Manuale di acustica
www.architetturasonora.it
mail: g.licitra@arpat.toscana.it
Assistente: Diego Palazzuoli (d.palazzuoli@ —)

Argomenti del corso:
-> descrizione grandezze fisiche (dB(A))
-> strumenti di misura
-> segnali acustici
-> propagazione
-> modelli
-> leggi -> misure -> limiti

S | Mezzo di prop. | R

Perché il decibel? L'orecchio misura con una scala logaritmica.
L'orecchio sente una var. minima di 20 μPa

$$db = 10 \log\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) \quad P_0 = 20\ \mu Pa$$

Max. udibile: 200 milioni di Pa. = 200 MPa

LEZIONE 2: 25/10/2010

Rumore:

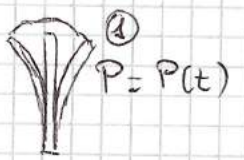
-> Edilizia scolastica
-> Traffico
-> Rumore esterno
-> Ambienti di lavoro
-> Acustica architettonica

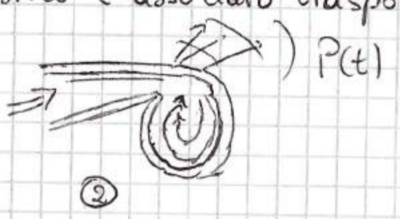
-> Rumore esterno : sorgente
Rumore interno

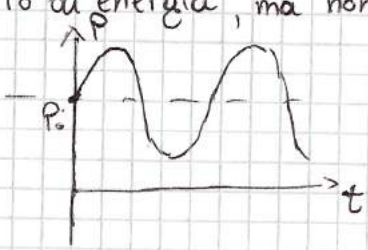
Generazione di suoni

Es. : corda di violino -> Vibrazione di solidi (1)
Fiati -> Turbolenze d'aria (2)

N.B. : al fenomeno acustico è associato trasporto di energia, ma non di materia!







Il suono si propaga solo in un mezzo elastico : nel vuoto non si propaga!
Il mezzo può essere:
gassoso, liquido, solido.

Direttività : capacità di concentrare in una direzione l'informazione (o l'energia).

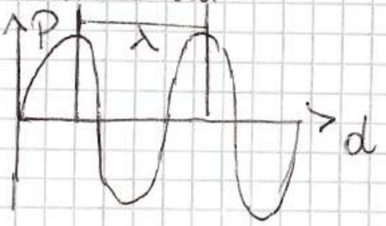
Suono : oscillazione di pressione che si propaga in un mezzo elastico ad una velocità e ad una frequenza tali da renderlo percettibile dall'orecchio umano.

Rumore : suono le cui caratteristiche di frequenza, livello, e variabilità nel tempo lo rendono disturbante o addirittura causa di ipoacusia

Frequenze udibili : Fino a ~16 000 Hz.

ONDE SONORE

-> Sinusoidali



$$\text{lunghezza d'onda } (\lambda) = \frac{\text{velocità del suono}}{\text{Frequenza}}$$

la frequenza è una caratteristica della sorgente
la velocità del suono è una caratteristica della sorgente.

IL DECIBEL

$dB = 10 \log_{10}\left(\frac{A}{A_0}\right)$ è adimensionale.

decibel sonoro: $dB = 10 \log_{10}\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right)$ P_0 = pressione sonora minima percettibile dall'orecchio umano $= 20\ \mu Pa$.

Perché il dB?

1) L'uso di una scala lineare comporterebbe l'utilizzo di 3 milioni di 1-tà;
2) L'orecchio umano risponde in modo logaritmico.

P_1 e P_2 sorgenti uguali.

$L_{P_1} = X\ dB$

$L_{P_2} = X\ dB$

P. es. $L_p = 60\ dB$

$60\ dB = L_p = 10 \log_{10}\left(\frac{P^2}{P_0^2}\right) \rightarrow$

$\rightarrow \left(\frac{P_0}{P_0}\right)^2 = 10^{L_p/10} = 1 \times 10^6$

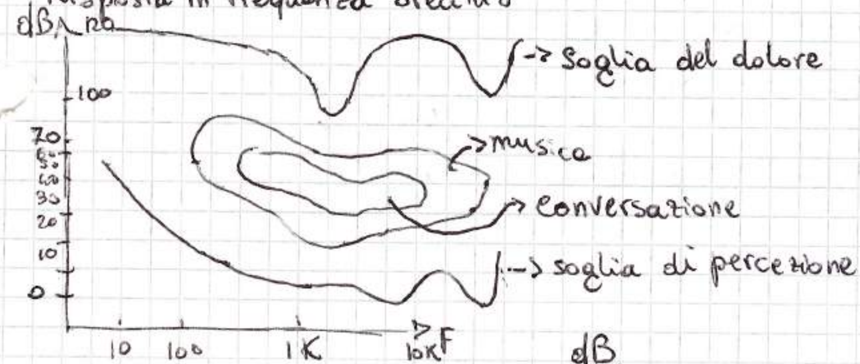
$L_1 + L_2 = 10 \log_{10}\left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}\right) = 10 \log_{10}\left(10^6 + 10^6\right) =$

$= 10 \log_{10}(2) + 10 \log_{10}(10^6) = (3{,}01 + 60)\ dB = 63{,}01\ dB$

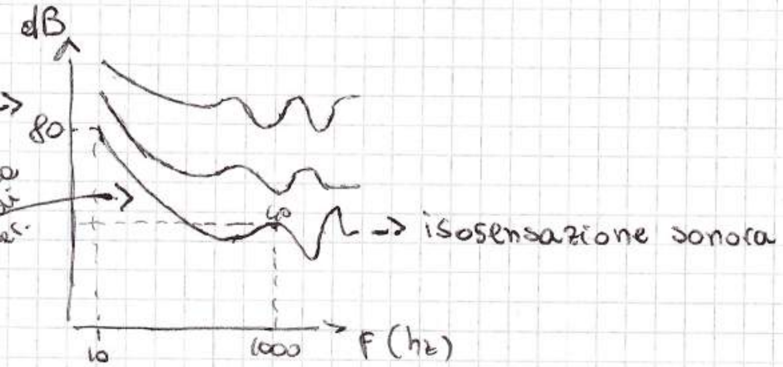
→ 3 dB rappresenta un raddoppio di livello sonoro.

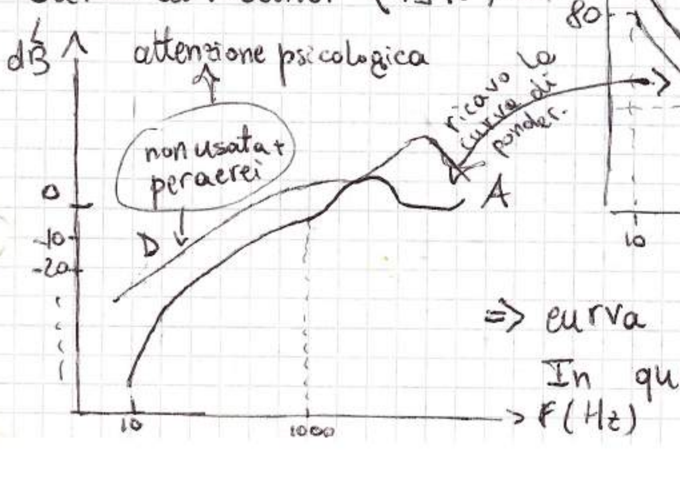
→ 4 automobili a 60 dB producono 66,02 dB!

Risposta in frequenza orecchio



Curve di Fletcher (1940) →





⇒ curva simmetrica a quella di Fletcher
In questo modo uno strumento diventa come l'orecchio.

Supponiamo d'avere un suono a 70 dB in tutte le frequenze.

dB	Hz	dB(A)
70	1000	70
70	500	67
70	250	55
70	125	50
70	63	40

Notiamo che un fonometro ricaverebbe 70 dB su tutte le frequenze, mentre un orecchio risponde secondo la curva di ponderazione.

LEZIONE 3 : 08/11/2010

Acustica di base - Cirillo → testo guida
Acustica Applicata - Spagnolo } testi di acustica.

Abbiamo già visto che le onde sonore si propagano in un mezzo elastico. Vediamo ora l' equazione delle onde, come si ricava.

Prima definiamo r.m.s. (root mean square) di una funzione f(t) :

$$\langle f^2(t)\rangle^{1/2} = \lim_{T\to+\infty}\left[\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)\,dt\right]^{1/2}$$

Onde sonore → pressione.

Potenza sonora: $L_W = 10\log_{10}\left(\frac{W}{W_0}\right)$ $\quad W_0 = 10^{-12}\,W$

Intensità sonora: $L_I = 10\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$ $\quad I_0 = 10^{-12}\,W/m^2$

La temperatura dell'aria influisce sulla velocità del suono c :

$c = 331,4\cdot\sqrt{\frac{T}{273}}$ m/s (T in Kelvin). Solitamente, per $T \sim -30° \div 30°$ C
$c \simeq 331,4 + 0,607\,\vartheta$ (ϑ → temp. in gradi)

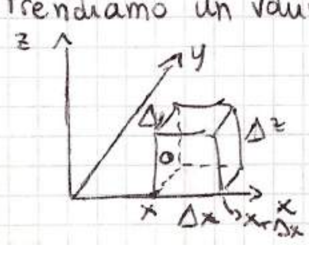
Impedenza acustica: $Z_A = \frac{P}{u}$ $\quad u(t)$: velocità di molecola

$I = \frac{P^2}{\rho_0 c} \Rightarrow D = \frac{I}{c} = \frac{P^2}{\rho_0 c^2}$ (densità)

I → Flusso di energia acustica

$$P(x,y,z;t) = p_0 + p(x,y,z;t) \qquad p: \text{pertubazione, t.c. } p_0 \gg p$$

Prendiamo un volumetto $\Delta x\Delta y\Delta z$, e l'onda di pressione che viaggia lungo x:



La forza agente sul lato ① è : $F = P\cdot S$

$$\begin{cases} p(x,y,z;t) & ① \\ p(x+\Delta x,y,z;t) & ② \end{cases} \Rightarrow F = [P(x) - P(x+\Delta x)]\,\Delta y\,\Delta z$$

Se abbiamo un pistone che si muove lungo x, si genera un'onda.

Se il pistone si muove periodicam., ho un'onda sinusoidale.

Tornando al volumetto:

$$F = [P(x) - P(x+\Delta x)]\, \Delta y \Delta z \simeq -\frac{\partial P}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z = -\frac{\partial P}{\partial x} dV = dM \frac{dv}{dt}$$

ovvero: $\boxed{\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{dM}{dV}\frac{dv}{dt}}$

Sapendo ora che le "trasformazioni" che avvengono durante la propagazione delle onde sonore sono adiabatiche: $PV^k = cost$.

$$V^k dP + kPV^{k-1} dV = 0 \Rightarrow \frac{dP}{P} = -k \frac{V^{k-1}}{V^k} dV = -k \frac{dV}{V}$$

Pertanto, ricordando che: $P = p_0 + p(t) \Rightarrow V = V_0 + \tau(t)$

Ovvero: $\frac{P}{P_0} = -k \frac{\tau}{V_0}$

Quindi, se $\xi(x)$ è lo spostamento della particella in x; $\xi(x) + \frac{\partial \xi}{\partial x}\Delta x$ sarà lo spostamento di quelle poste in $x + \Delta x$.

L'incremento di volume è pertanto: $\tau = V_0 \frac{\partial \xi_x}{\partial x} \Rightarrow \boxed{\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \frac{\partial^2 \xi_x}{\partial x \partial t}}$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = V_0 \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{V_0}{k}\frac{1}{p_0}\frac{\partial P}{\partial t}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -p_0 k \frac{\partial v}{\partial x} \quad , \quad -\frac{\partial P}{\partial x} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad \Rightarrow \frac{\partial P}{\partial t} = -p_0 k \frac{\partial v}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2} P = -k p_0 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t}$$

Ma anche: $\boxed{\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 k \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}}$ equazione delle onde, con soluzione generale:

c

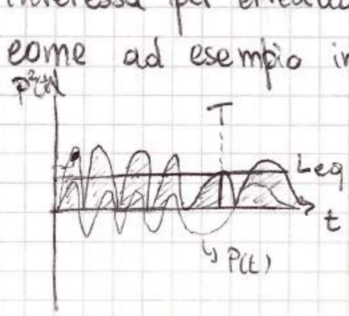
$f(x - ct) + \rho(x + ct)$

$p(t) = A \cos(\omega t + \phi)$ oppure: $p(t) = A e^{i(\omega t + \vec{k}\cdot\vec{x})} + B e^{-i(\omega t + \vec{k}\cdot\vec{x})}$

Queste formule sono valide frequenze per frequenza. In generale si dovrà effettuare una scomposizione di Fourier $\Rightarrow f(t) = \sum a_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$

Si definisce poi livello equivalente $L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T}\int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt$ (*)

Ci interessa per effettuare operazioni di media sui valori della pressione $p(t)$, come ad esempio in figura:



(*) Importante per le normative!

Livelli: → immissione
→ emissione
→ differenziale

usano tutti il concetto di livello eq. ⇒ energia sonora totale.

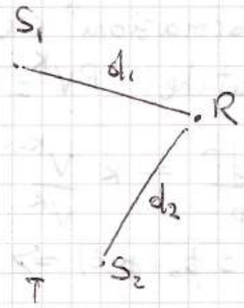
Analisi del livello sonoro: nel tempo / nelle frequenze

SOMMA DI LIVELLI SONORI

Siano S_1, S_2 sorgenti ed R un ricevitore

$$P_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t)$$

$$P_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi)$$



Se io usassi la formula delle somme dei livelli sonori:

$$L_{eq} = 10 \log\left(10^{\frac{L_{eq,1}}{10}} + 10^{\frac{L_{eq,2}}{10}}\right) = 10 \log \frac{1}{T}\int_0^T \left(p_1^2(t) + p_2^2(t)\right) dt$$

però la pressione nel punto R è:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi)$$

che al quadrato dà: $p(t)^2 = A_1^2 \cos^2(2\pi f_1 t) + A_2^2 \cos^2(2\pi f_2 t + \phi) + 2 A_1 A_2 \cos(2\pi f_1 t)\cos(2\pi f_2 t + \phi)$

che è dunque diverso! Qual è l'approx. usata? Che S_1 ed S_2 siano scorrelate, e che quindi: $\langle \cos(2\pi f_1 t)\cos(2\pi f_2 t + \phi)\rangle = 0$

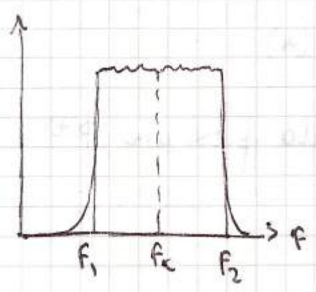
Trovare $P^2(t)$ e $L_{eq,T}$ $\quad T \gg \max\left\{\frac{1}{f_1}, \frac{1}{f_2}\right\}$ nei casi:

S_1: $P_1(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t)$ $\quad$ ① $A_1 = A_2$, $f_1 = f_2$, $\phi \neq 0$

S_2: $P_2(t) = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi)$ $\quad$ ② $A_1 \neq A_2$, $f_1 = f_2$, $\phi = 0$

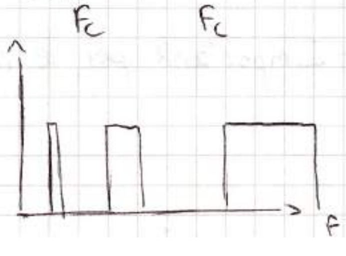
FILTRI UTILIZZATI

Passa banda in relazione geometrica: $f_c = \sqrt{f_1 f_2}$, $f_2 = 2^n f_1$ $\quad$ ottava: $n = 1$ $\quad$ terzo d'ottava: $n = \frac{1}{3}$

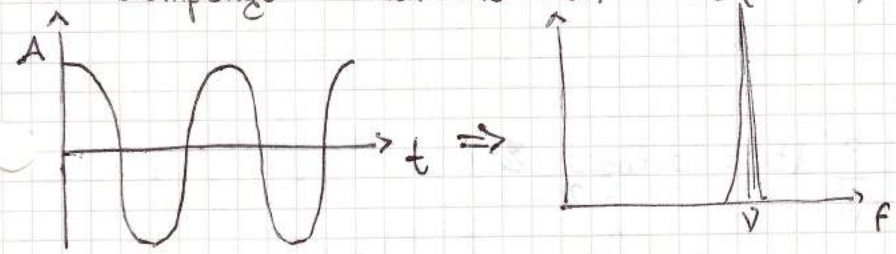


Filtri fatti così, hanno il rapporto

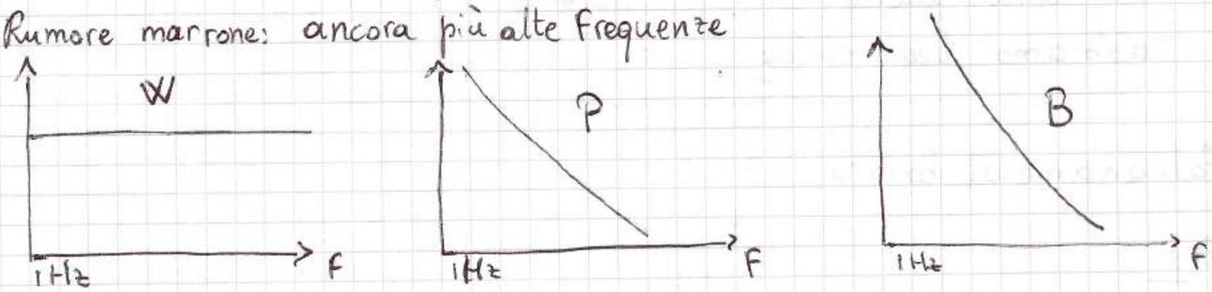
$$\frac{f_2 - f_1}{f_c} = \frac{\Delta f}{f_c} = \text{costante}$$



Se io scompongo la funzione $f(t) = A\cos(2\pi\nu t)$



Rumore bianco: stesso peso a tutte le frequenze (radio non sintonizzata, fruscio)
Rumore rosa: basse frequenze (foglie...)
Rumore marrone: ancora più alte frequenze



LEZIONE 4: 12/11/2010

Riepilogo

$dB = \log \frac{P^2}{P_0^2}$

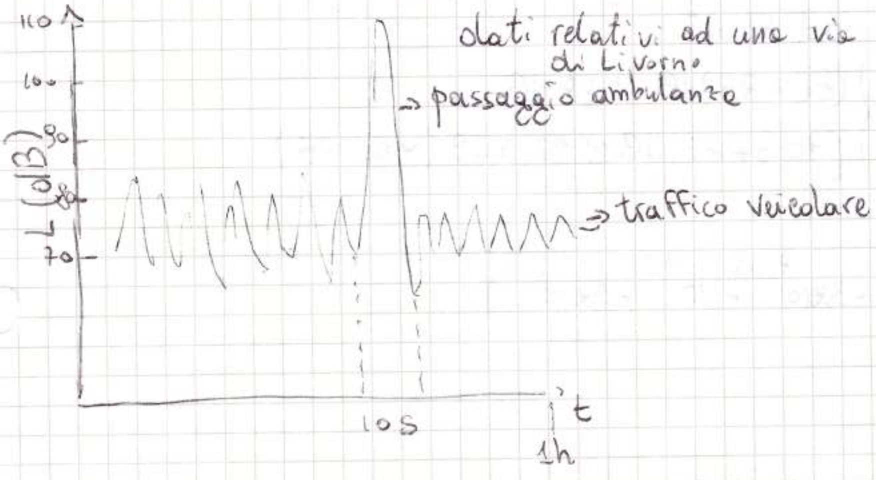
mezzi leggeri ↓ 70 dB ↘ 80,5 dB
80 dB ↗ 80,5 dB
↑ mezzo pesante

$70 + 70 = 73$ 2
$73 + 73 = 76$ 4
$76 + 76 = 79$ 8

$8L + 1P = 83$ dB
$8L + 2P = 85$ dB
$9L + 1P \simeq 83$ dB

Se io dimezzassi i veicoli leggeri (4L) tenendo sempre 2P: $76 + 83 = 84{,}5$.
Si vede che non cambia quasi nulla.
Però dimezzando i mezzi pesanti, si riduce decisamente il rumore, come visto prima.

Livello equivalente: $\boxed{L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2}\, dt}$

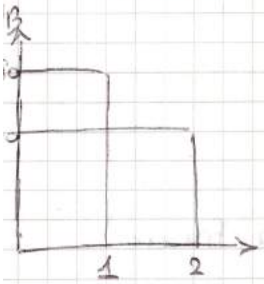


Leq (Ambulanza) = 99,4 dB(A)
Leq (Residuo) = 68,8 dB(A)
Leq (Ambientale) = 75,0 dB(A)

↓ mi sono bastati 10 sec di ambulanza per portare il livello a 75. Soltanto sarebbe 68,8.

LEZIONE 5: 15/11/2010

Somma di livelli nel tempo



$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2}{p_0^2} dt = 10 \log \frac{1}{2} \left(1 \cdot 10^{L_1/10} + 1 \cdot 10^{L_2/10} \right) =$$

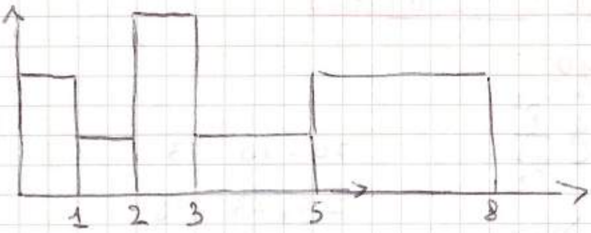
$$= 10 \log \frac{1}{2} \left(10^8 + 10^5 \right) =$$

$$= 10 \log \left(\underbrace{10^8 + 10^5}_{\approx 10^8} \right) - \underbrace{10 \log 2}_{\approx -3} \simeq 77 \text{ dB}$$

per livelli discreti abbiamo: $\boxed{L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \sum_i 10^{L_i/10}}$

Esempio: falegname al lavoro

dB	hrs	
85	1	(pialla)
70	1	(pausa)
90	1	(incudine, limature...)
70	2	(servizi vari) $\rightarrow$ p.r.
80	3	(martelli...)



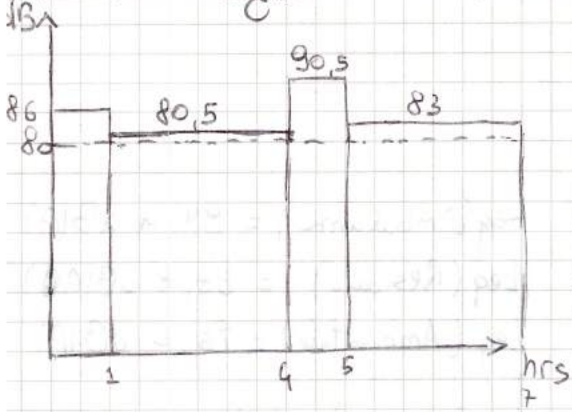
$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{8} \left(10^{8,5} + 3 \times 10^{7} + 10^{9} + 3 \times 10^8 \right) = 10 \log \left(10^{8,5} + 3 \times 10^7 + 10^9 + 3 \times 10^8 \right) - 10 \log 8 =$$

$\boxed{\text{N.B}}$: $2 \times 10^8 = 10^{8,3} \rightarrow 3 \times 10^8 = 10^{8,5}$ $\qquad = 83$ dB

Supponiamo ora che siano due operai, però uno non si occupa di p.r.

Rumore di fondo 80 dB

Per 2 hrs agisce anche un'altra sorgente ad 85 dB.



Ora aggiungiamo anche le 2 hrs di sorgente ad 85 dB:

$$\begin{cases} (86 + 85) \text{ dB} \simeq 88 \text{ dB} \\ (90,5 + 85) \text{ dB} \simeq 91,5 \text{ dB} \ (\simeq 92 \text{ dB}) \end{cases}$$

da cui: $L_{eq} = 10 \log \frac{1}{8} \left(10^{8,8} + 3 \times 10^{8,05} + 10^{9,2} + 3 \times 10^{8,3} \right)$

dB	hr
88	1
70	2
75	2

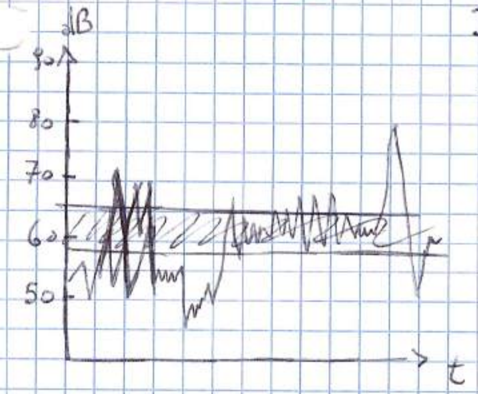
Rumore di fondo costante per 4 hrs 80 dB
+ Sorgente ext 82 dB per 2 hrs
(N.B.: La giornata lavorativa è sempre e comunque 8 hrs)

$$L_{eq_{amb}} - L_{eq_{res}} = L_{eq_{sorg}}$$

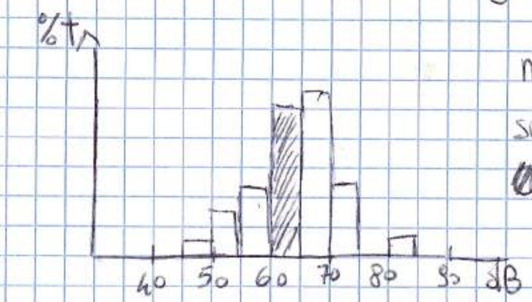
N.B.: $L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \left(10^{L/10} + \dots \right)$

$\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \longrightarrow$ perché se $L = dB = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \rightarrow \left(\frac{P}{P_0}\right)^2 = 10^{L/10}$

Ricostruzione segnali: Valori percentili.

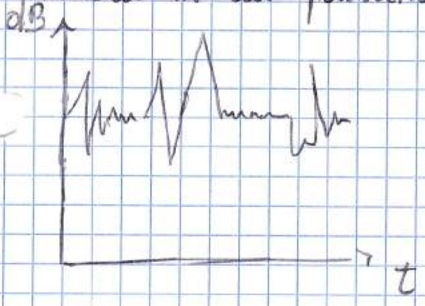


Il livello equivalente spesso non dà abbastanza informazioni sul rumore: creiamo un istogramma particolare:

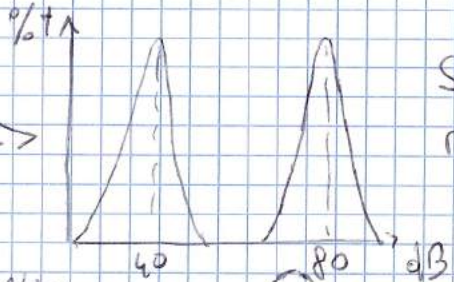


mi dà informazioni sui segnali!
Posso calcolare la prob. di avere un rumore ~~tra~~ a quel livello.

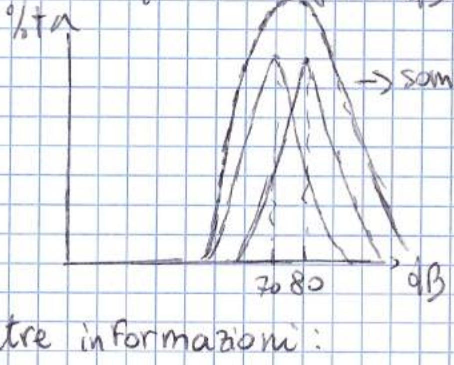
Per esempio, se io avessi un grafico dei dB in una strada in cui passano mezzi elettrici e pesanti:



$\Longrightarrow$

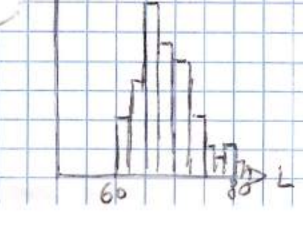


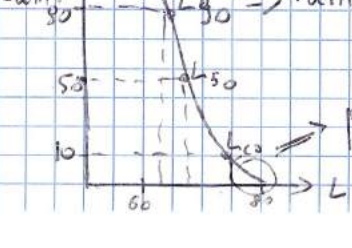
Se le sorgenti sono così rumorose, le distinguo bene.



→ somma: non distinguo due segnali!

Possiamo avere ancora altre informazioni:





$L_{90} \Rightarrow$ rumore di fondo, superato nel 90% dei casi

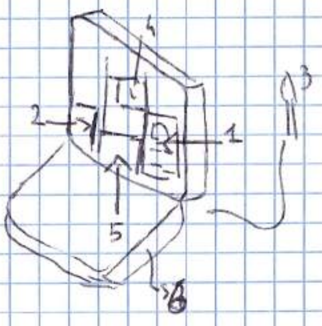
picchi

Metodi Analisi del suono

Analisi statistica temporale — curve cumulative : liv. sonoro superato % di tempo
— curva distributive : % di permanenza

Principio di funzionamento di un microfono a condensatore

Componente base del Fonometro:



① Fonometro
② Modem GSM
③ Microfono
④ DAT
⑤ Batteria 12 Volt.
⑥ Valigetta.

→ A condensatore. Membrana e placca posteriore costituiscono le armature di un condensatore il cui dielettrico è l'aria.

$V = \frac{Q}{C}$, dove $C = \varepsilon \frac{S}{d}$

$\boxed{V = \frac{Q}{\varepsilon S} d}$

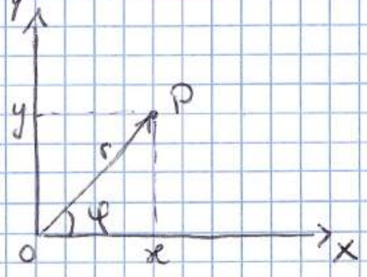
Ho realizzato un trasduttore, ovvero un oggetto che trasformo quello che voglio misurare (la pressione) in segnali elettrici.

Ottengo una proporzionalità tra V e p

Per la calibrazione: → calibratore: 93,8 dB a 1000 Hz
pistonofono: 125 hz, 124 dB e
93,8 dB a 1000 Hz.

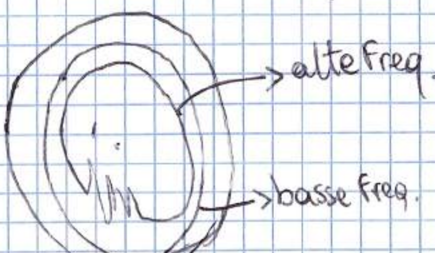
LEZIONE 6: 19/11/2010

Diagramma Polare



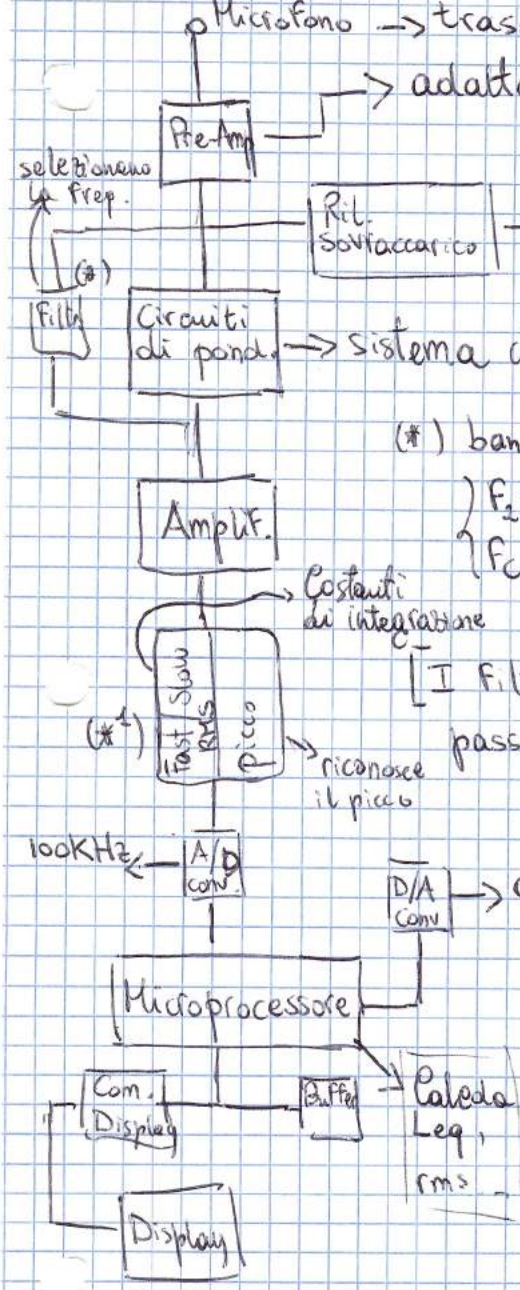
$P = (x, y) = (r, \varphi)$ → servirà per determinare la direzione di un suono.

→ Microfono: dovrà essere isotropico, cioè dovrà avere la risposta uguale in tutte le ~~risposte~~ direzioni.



Isotropia raggiunta per basse frequenze, per cui si ha lunghezza d'onda maggiore, che non interferisce con il microfono (o con la struttura del fonometro).

Struttura del Fonometro

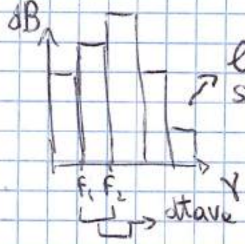


L'impedenza del microfono deve essere adattata per proseguire nel fonometro, altrimenti rimbalzerebbe tornando nel mic.

Circuiti di pond. → sistema che attenua le basse frequenze, per riprodurre la curva A

(*) bande di ottava

$$\begin{cases} f_2 = 2f_1 \\ f_C = \sqrt{f_1 f_2} = f_1\sqrt{2} \end{cases}$$



le ottave non sono larghe uguali (non sono costanti in ampiezza)

↓

banda in % costante

[I filtri sono del tipo passa banda]

A seconda dei segnali ho dati diversi (ma guarda 1 pò)

Se il segnale cambiasse nel tempo, non basta un analizzatore seq., ma ci vuole un sistema che analizzi in tempo reale...

(*1): terminologie in uso, anche se non più "corrette", risalente a quando il fonometro era ad ago, fast/slow/RMS: per segnali fast la lancetta non si muoverebbe immediatamente

I segnali sono di tipo

- FAST
- SLOW
- IMPULSE
- PEAK

A base dei rilevatori ci sono circuiti RC

Fast: $\tau = 125$ msec → segue abbastanza il segnale

slow: $\tau = 1$ sec → scende lentamente "media il segnale istantaneo"

Impulse: scende molto rapidamente.

↓

segnale impulsivo → +3 dB di penalizzazione

- → ripetitivo: 10 volte di giorno, 2 volte di notte
- → caratterizzato: segnale a -10 dB < 1 sec
- → fare misura in slow & impulse

R.M.S. root mean square

$$\text{Livello R.M.S} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2(t)\,dt}$$

$$\text{Livello medio: } \frac{1}{T}\int_0^T |x|\,dt$$

Strumentazione Presidiata

Secondo per secondo

Fonometro → L_{eq}; SPL; L_{MIN}; L_{MAX}, MaxPeak.

Medie Energetica

Analizzatore Statistico → Livelli percentili

Analizzatore di Frequenza → Analisi in tempo reale

Analisi Freq. con software per ~~ioe banda~~ analisi statistica in banda → Analisi statistica ed in Freq. per banda

Microfono + Catena acquisizione + Calcolatore → Analisi completa dei fenomeni + riascolto eventi su supporto magnetico.

File .wav

Strumentazione non Presidiata

Strumentazione Fissa in esterno con Analizzatore Statistico → Misure di rumore in ~~prossi~~ prossimità di Aereoporti

Mezzo Mobile → misure sul campo di lunga durata

Carrello Trasportabile → prestazioni del mezzo, ma costo più contenuto (senza motore)

Centraline Mobile → dimensioni contenute, facilità di trasporto (~6000 euro)

- Alimentazione autonoma.
- → utilizzo dei MEMs ?

LEZIONE 7: 22/11/2010

Variabili Acustiche

Spostamento $\vec{s}$ (vettore) di un corpo dalla sua posizione di equilibrio

$\vec{s}(t) \rightarrow$ variabile fondamentale del solido.

Fluidi ~ mezzo continuo.

Proprietà
Stato $\rightarrow$ valori medi di un volumetto.
Comportamento

$\rightarrow$ In generale, lo spostamento è funzione dello spazio e del tempo

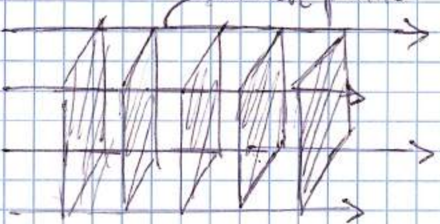
$\rightarrow$ Variazioni locali di densità $\rightarrow$ pressione

$$\rho(t) = \rho_0 + \rho_1 \Rightarrow P(t) = P_0 + P_1$$

Onde Piane & onde Sferiche

$$c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad c^2 = k \frac{P_0}{\rho_0} \Rightarrow \boxed{p(x,t) = F(ct-x) + G(x+ct)}$$

k costante adiabatica (1,4 per aria)



$\rightarrow$ onde piane: p è costante su ogni piano ortogonale alla direzione di propagazione $\rightarrow$ Fronti d'onda

$F(ct-x)$: onde progressive, che "escono" dalla sorgente.

$$F(ct-x) \rightarrow \delta t + t \;:\; c\delta t - \Delta x = 0 \Leftrightarrow \Delta x = c\delta t$$

l'onda avanza di $c\delta t$

Al contrario, $G(ct+x)$ "entra" nella sorgente.

Abbiamo visto che $\frac{\partial P}{\partial x} = \underbrace{\frac{dM}{dV}}_{=\rho_0} \frac{dv}{dt}$

La velocità di una particella è data da $v = \frac{1}{\rho_0 c}[F+G]$

$$\boxed{\frac{P}{v} = \rho_0 c}$$ (407 Pa) per aria a 20°C

impedenza caratteristica

Onda piana progressiva ed armonica:

$p(x,t) = \hat{p} \cos[k(ct-x)] = \hat{p}\cos(\omega t - kx)$, dove $\omega = kc$, $T = \frac{2\pi}{\omega}$

Oppure in notazione complessa:

$p(x,t) = Re\{\hat{p} e^{i(\omega t - kx)}\}$ ⇒ conviene usarla finché si tratta quantità non quadrate

Nel caso di perdita di energia, il tutto sarà modulato da un' exp decrescente

$\tilde{p}$ → dissipativa ⟺ $e^{x(n+im)}$ che modula tutto

→ causa dissipazione

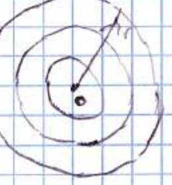
Nell'aria la dissipazione è causata dalla viscosità e dalle interazioni molecolari.

Onde piane & sferiche

Onde sferiche: sfere concentriche → sup a p = costante.

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

velocità di volume.



$$p(r,t) = \frac{\rho_0}{4\pi r}\dot{Q}\left(t - \frac{r}{c}\right)$$

$$v_r = \frac{1}{4\pi r^2}\left[Q - \dot{Q}\right]$$

Sfera pulsante con moto armonico:

$Q(t) = \tilde{Q} e^{i\omega t}$

compare sfasamento tra p e v.

$$p(r,t) = \frac{i\omega\rho_0}{4\pi r}\tilde{Q} e^{i(\omega t - kr)} \Rightarrow v_r = \frac{p}{\rho_0 c}\left(1 + \frac{1}{ikr}\right)$$

Notiamo che se $kr \gg 1$, le onde sferiche sono app. ad onde piane.

Più in generale: $\boxed{p(r,\vartheta,\varphi,t) = \frac{A}{r}\Gamma(\vartheta,\varphi)e^{i(\omega t - kr)}}$

Fattore & indice di direttività

Fattore di direttività: rapporto tra intensità a distanza r in una direzione e quella che sarebbe prodotta nello stesso punto da una sorgente puntuale isotropa che emetesse la stessa intensità acustica.

$$Q = \frac{4\pi r^2 I}{W} \qquad Q = Q(\vartheta,\varphi) = \frac{I(\vartheta,\varphi)}{I_{iso}} = \frac{I\, 4\pi r^2}{W_{sorg.}}$$

$I_{iso} = \frac{W}{4\pi r^2}$

$\boxed{I = cD}$ → densità energia

Indice di direttività : $DI = 10 \log_{10}(Q)$

Intensità e densità di energia delle onde sonore nei fluidi

$$(P_{rms})^2 = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} p^2(x,t) \rightarrow \text{per un'onda piana } p = \rho_0 c v$$

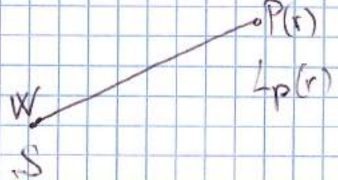
anche x onda sferica $kr \gg 1$

$$\boxed{w = \frac{P_0^2}{\rho_0 c^2}}$$

Sappiamo che $L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$ $\quad p_0 = 20 \cdot 10^{-6}\ Pa$

$L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$ $\quad I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$

Abbiamo una sorgente S omnidirezionale (sferica puntuale), che emette W.



$$Q = \frac{I}{I_{ISO}} \rightarrow I = Q\, I_{ISO}$$

$$\frac{p^2}{\rho_0 c} = I \Rightarrow L_I = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = 10 \log_{10}\left(\frac{p^2}{\rho_0 c}\frac{1}{I_0}\right)$$

Ovvero $L_I = 10 \log_{10}\left(\frac{p^2}{\rho_0 c} \cdot \frac{p_0^2}{p_0^2}\frac{1}{I_0}\right) = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\frac{p_0^2}{\rho_0 c I_0}\right)$ $\quad p_0^2 \rightarrow 400 \times 10^{-12}$, $\rho_0 c I_0 \rightarrow 400$

$$= 10 \log_{10}\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) + \cancel{10 \log_{10} 1} = L_p$$

Quindi se S è isotropa, $L_p = L_I$

Sappiamo ora anche che $\frac{W}{4\pi r^2} = I = \frac{W}{W_0} \cdot \frac{W_0}{4\pi r^2} \Rightarrow \frac{I}{W_0} = \frac{W}{W_0 4\pi r^2}$

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W}{W_0} + 10 \log \frac{1}{4\pi r^2} \rightarrow L_I = L_W \underbrace{-10 \log_{10} 4\pi}_{11} - 20 \log r$$

$\boxed{L_p(r) \simeq L_W - 11 - 20 \log_{10} r}$ Questa è valida finché trattiamo sorgenti omnidir.

$Q = \frac{I}{I_{ISO}} \Rightarrow I = Q \cdot I_{ISO}$ $\quad 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log Q + 10 \log \frac{I_{ISO}}{I_0}$ (sorgente non isotropa)

$$L_I = DI(\vartheta, \varphi) + L_I$$

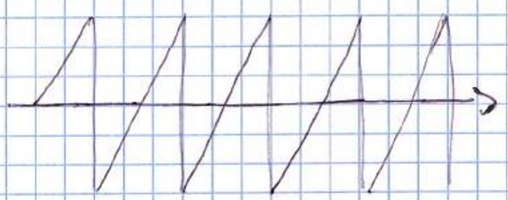
$$L_p \simeq L_W - 11 - 20 \log r + DI$$

N.B: se la sorgente è lineare (ex: strada, ferrovia):

$W/\Delta l$ $\quad I = \dfrac{W/\Delta l}{2\pi r \Delta l} \Rightarrow L_p \simeq L_w - \underbrace{10 \log 2\pi}_{8} + 10 \log r + DI$

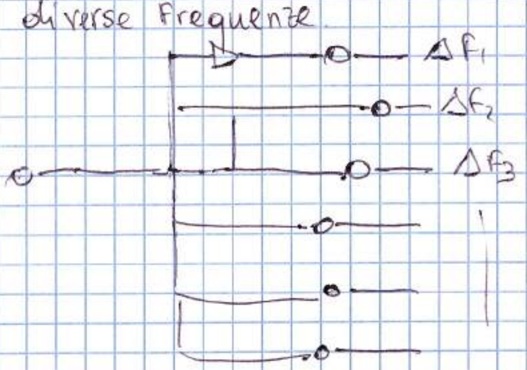
Analisi in frequenza

Moto armonico → tutti i segnali possono essere scomposti in somma di oscill. armoniche
→ Analisi di Fourier



Il dente di sega è scomponibile in somme di seni.

→ Realizzazione analisi di Fourier.
Sperimentalmente: Helmotz. Set di risuonatori a cavità sintonizzate su diverse frequenze



→ filtri in banda di ottava o terzi d'ottava.

Il valore RMS della pressione (filtro) in ogni banda è detto livello di pressione nella banda

Spettro sonoro: $BN = 10 \log_{10} f_c \quad f_c = \sqrt{f_u f_e}$ con $\dfrac{f_u}{f_e} = 2^{(N^{-1})} \quad N = 1, 3$

$$\Delta f = f_c \frac{2^{N^{-1}} - 1}{2^{1/2N}}$$