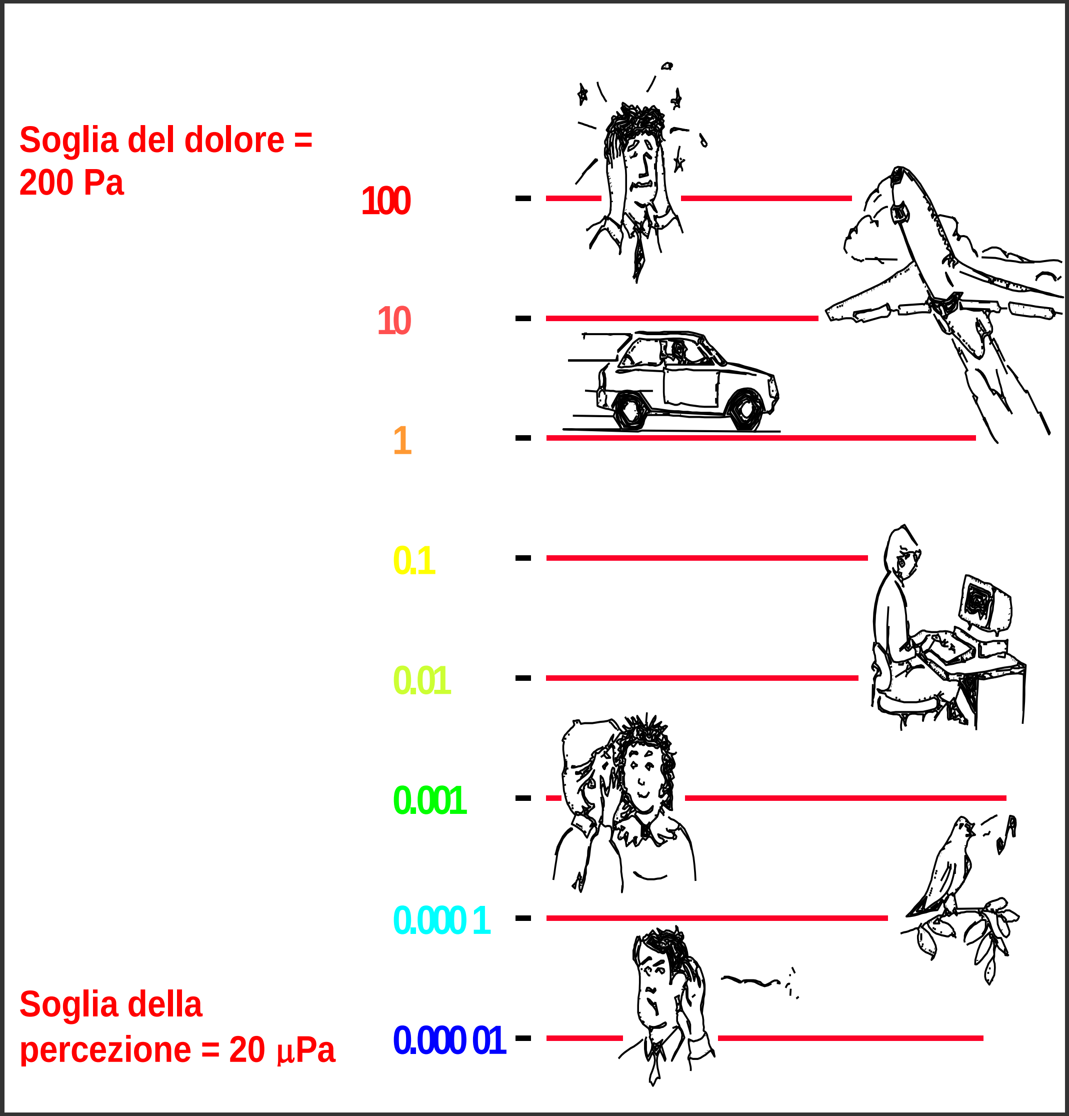
2

Lezioni di acustica

Livelli

Range della pressione sonora



La pressione acustica nell'intervallo che va dalla soglia di udibilità a quella del dolore varia da ***20 μPa*** (minimo percettibile) a ***200 Pa*** (soglia del dolore).

Utilizzando una scala lineare nella rappresentazione della pressione si hanno i seguenti aspetti negativi

- necessità di numeri con almeno 6 cifre, interi o decimali a seconda che si usi il μPa o il Pa
- cattiva correlazione della grandezza considerata alla risposta dell'orecchio umano, la quale è di tipo logaritmico

Il livello di pressione sonora

Per avere una corrispondenza più immediata tra la grandezza fisica p e la percezione dell'uomo e per comprimere la scala si introduce il ***livello di pressione sonora*** L_p :

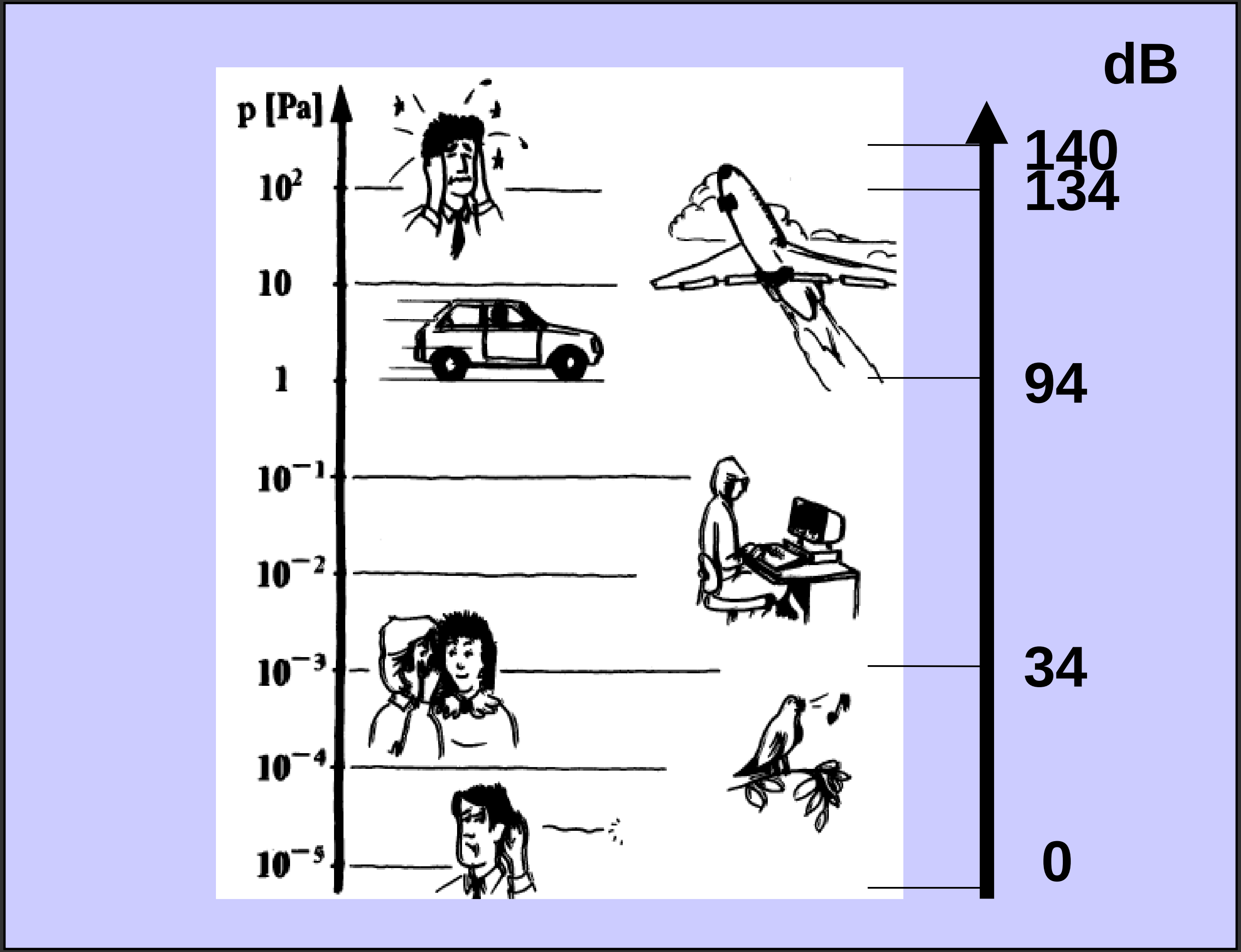
$$L_p = 10 \log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) \quad \text{dB}$$

In altri termini si passa ad una scala logaritmica e si introduce una ***pressione di riferimento*** p_0 che corrisponde alla soglia di udibilità per l'orecchio umano

$$p_0 = 20 \; [\mu Pa]$$

Il livello di pressione sonora corrisponde a 10 volte il logaritmo, in base 10, del rapporto, al quadrato, tra il valore corrente di pressione e quello assunto come riferimento.

Campo di variazione del livello di pressione sonora



Effetto della variazione di livello sonoro

Variazione del Livello Sonoro (dB)	Variazione della Sensazione percepita
3	Appena percepibile
5	Differenza percettibile
10	Forte il doppio (o 1/2)
15	Grandi variazioni
20	Forte 4 volte (o 1/4)

Il livello di una grandezza

In generale considerata una ***grandezza J*** si può esprimere il suo valore in termini di ***livello***, ***L_J***, e quindi in decibel utilizzando l'operatore:

$$10\log\left(\frac{J}{J_0}\right)$$

con ***J_0* valore di riferimento** scelto opportunamente.

La grandezza livello è espressa in ***decibel, dB,*** ossia in decimi di bel, dal nome dello scienziato - Bell - che per primo introdusse questa tecnica di rappresentazione delle grandezze nel campo dell'elettrotecnica e dell'analisi dei segnali.

N.B. Un rapporto tra grandezze omogenee è adimensionale; il ***dB non è***, quindi, una ***unità di misura***, è una unità di valutazione.

Livello di intensità sonora

Per correlare l'***intensità sonora***, ***I [W/m²]***, alla percezione dell'uomo si introduce il ***livello di intensità sonora*** L_I :

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

I_0 [W/m^2]: intensità sonora di riferimento scelta a partire dalla pressione sonora di riferimento 20 [μPa] che corrisponde alla soglia di udibilità dell'orecchio umano.

$$I_0 = \frac{{p_0}^2}{\rho_0 c} = \frac{\left(20 \cdot 10^{-6}\right)^2}{400} = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$$

Potenza sonora

Si definisce ***potenza sonora*** l'energia emessa, nell'unità di tempo, da una sorgente sonora. Essa è misurata in watt [W].

La potenza sonora è descrittiva della causa del fenomeno acustico, la pressione invece dell’effetto sul soggetto umano

Anche la potenza sonora può essere espressa in termini di livello. Si parla in questo caso di ***livello di potenza sonora*** **L_W**:

$$L_W = 10 \log\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad \text{dB}$$

W_0: potenza sonora di riferimento = 10^{-12} [W] corrispondente alla intensità di riferimento su 1 m^2

Valori indicativi della potenza sonora irradiata da alcune sorgenti [W]

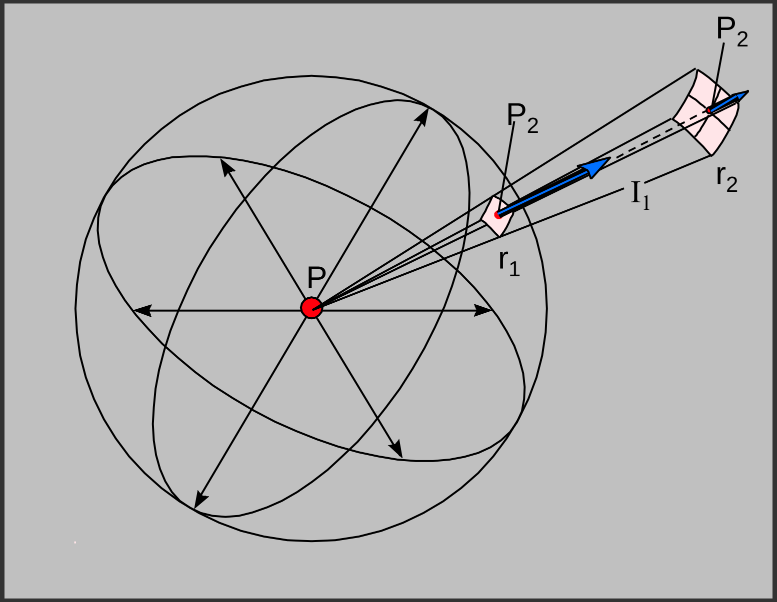
Razzo Saturno	50’000’000	Tromba	0.31
Squadriglia di jet	50'000	Pianoforte	0.27
Motore di turboreattore	10'000	Automobile in velocità	0.1
Aereo leggero al decollo	100	Clarinetto	0.05
Timpani	25	ventilatore centrifugo	0.01
Fortissimo orchestrale	10	Voce molto forte	0.001
Trombone	6	Lavastoviglie	0.0001
Martello pneumatico	1	Sussurro	0.000001

Propagazione dell'onda e livello di pressione

Data una certa potenza W, che si distribuisce su di una superficie S, l'intensità corrispondente vale:

$$I = \frac{W}{S}$$

Le onde sonore che si propagano da una sorgente puntiforme sono onde sferiche. L'energia emessa si distribuisce su di una superficie sempre più grande mano a mano che l'onda si propaga.



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

W: potenza della sorgente [W]

r: distanza dalla sorgente [m]

Propagazione dell'onda e livello di pressione

Data la relazione esistente tra intensità sonora e pressione sonora si possono operare le seguenti trasformazioni:

$$I = \frac{{p_{eff}}^2}{\rho_0 c} = \frac{W}{4\pi\, r^2}$$

$$W = I\, 4\pi\, r^2 = \frac{p^2}{\rho_0 c} 4\pi\, r^2$$

$$\frac{W}{W_0} = \frac{p^2}{{p_0}^2} 4\pi\, r^2$$

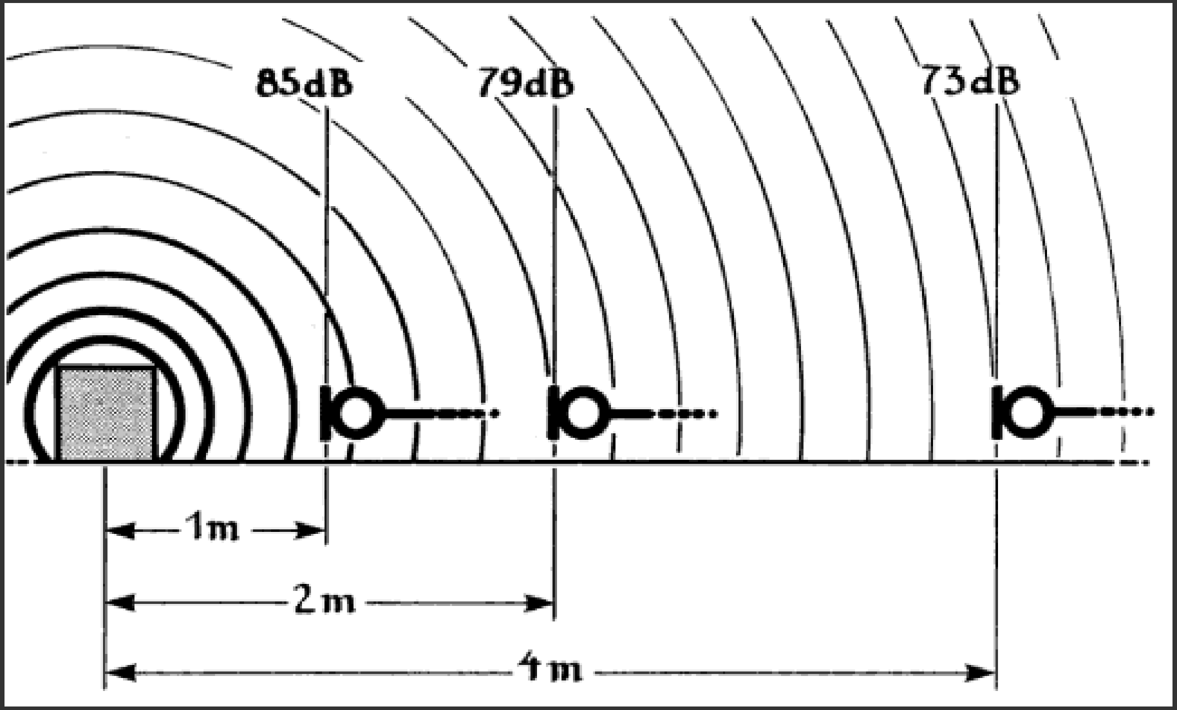
$$W_0 = \frac{{p_0}^2}{\rho_0 c}$$

$$10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{p^2}{{p_0}^2} + 10 \log 4\pi\, r^2$$

$$10 \log \frac{p^2}{{p_0}^2} = 10 \log \frac{W}{W_0} - 10 \log 4\pi\, r^2$$

Il livello di pressione sonora alla distanza r dalla sorgente con livello di potenza L_w si ottiene allora con la relazione:

$$L_p = L_W - 20\log r - 11$$



Il livello di pressione sonora si riduce di 6 dB per ogni raddoppio della distanza della sorgente.

Direttività di una sorgente

omnidirezionale è una sorgente che irradia uniformemente in tutte le direzioni.

monodirezionale o ***spot***, è una sorgente che focalizza su una sola direzione.

Per caratterizzare la direzionalità di una sorgente si introduce il ***fattore di direttività, Q***:

$$Q = \frac{I}{I_0}$$

I : intensità sonora [W/m^2] in un determinato punto dello spazio, alla distanza **r** [m] dalla sorgente che emette con potenza **W** [W];

I$_0$: intensità sonora di riferimento calcolata come l'intensità che si genererebbe nello stesso punto se la medesima sorgente fosse omnidirezionale ovvero:

$$I_0 = \frac{W}{4\pi r^2}$$

La direttività può essere espressa in termini logaritmici attraverso l'**'indice di direttività**, **q**.

$$q = 10 \log Q = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

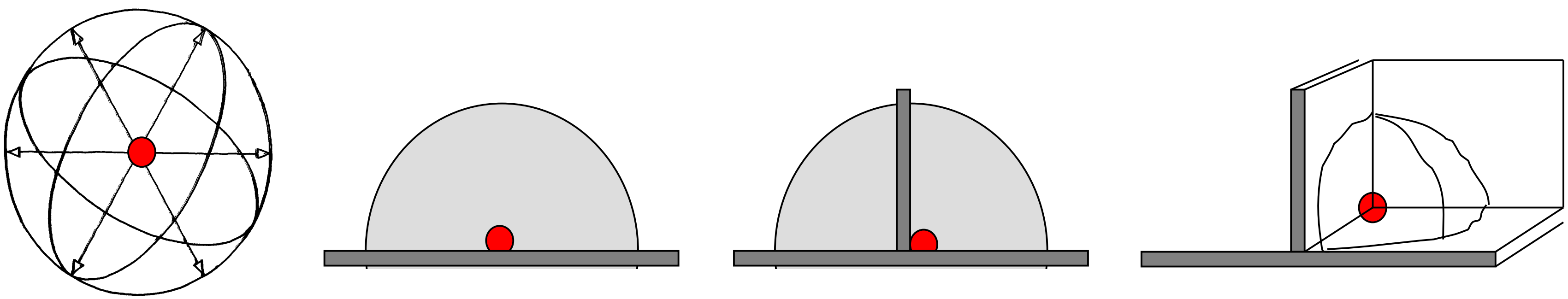
Esso esprime l'aumento in decibel del livello di intensità sonora dovuto alla direttività della sorgente considerata rispetto al livello che, a parità di potenza sonora, si otterrebbe nel medesimo punto dello spazio se la sorgente fosse omnidirezionale.

Utilizzando la direttività l'intensità sonora prodotta da una sorgente puntiforme direzionale a una distanza r si può esprimere con la relazione:

$$I = \frac{W\,Q}{4\pi\, r^2}$$

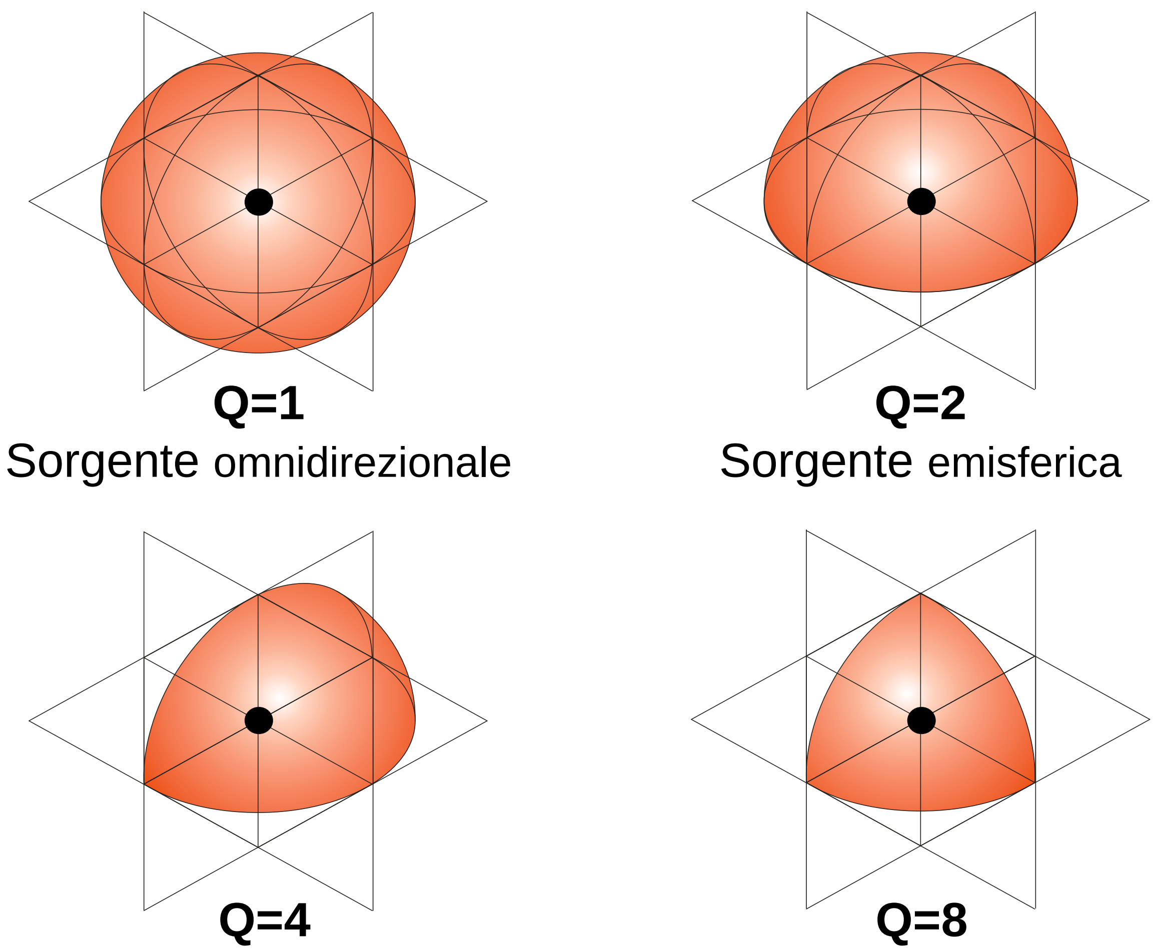
Direttività di una sorgente

L'effetto di superfici riflettenti poste nelle immediate vicinanze della sorgente può essere rappresentato da un'opportuna direttività ricavabile in funzione di differenti configurazioni geometriche.



$S_{sfera} = 4 \pi r^2$	$S = 1/2\ S_{sfera}$	$S = 1/4\ S_{sfera}$	$S = 1/8\ S_{sfera}$
$Q = 1$	$Q = 2$	$Q = 4$	$Q = 8$
$q = 0$ dB	$q = 3$ dB	$q = 6$ dB	$q = 9$ dB

Direttività di una sorgente



Ripasso sulle proprietà dei logaritmi

1. Il prodotto di numeri assoluti è la somma dei logaritmi e quindi dei decibel

$$10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A \times B) = 10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A) + 10\ \mathrm{Log}_{10}\ (B)$$

2. Il quoziente di numeri assoluti è la differenza dei logaritmi e quindi dei decibel

$$10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A / B) = 10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A) - 10\ \mathrm{Log}_{10}\ (B)$$

3. L'esponente di numeri assoluti è il coefficiente moltiplicativo dei logaritmi e quindi dei decibel

$$10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A^2) = 2 \times 10\ \mathrm{Log}_{10}\ (A)$$

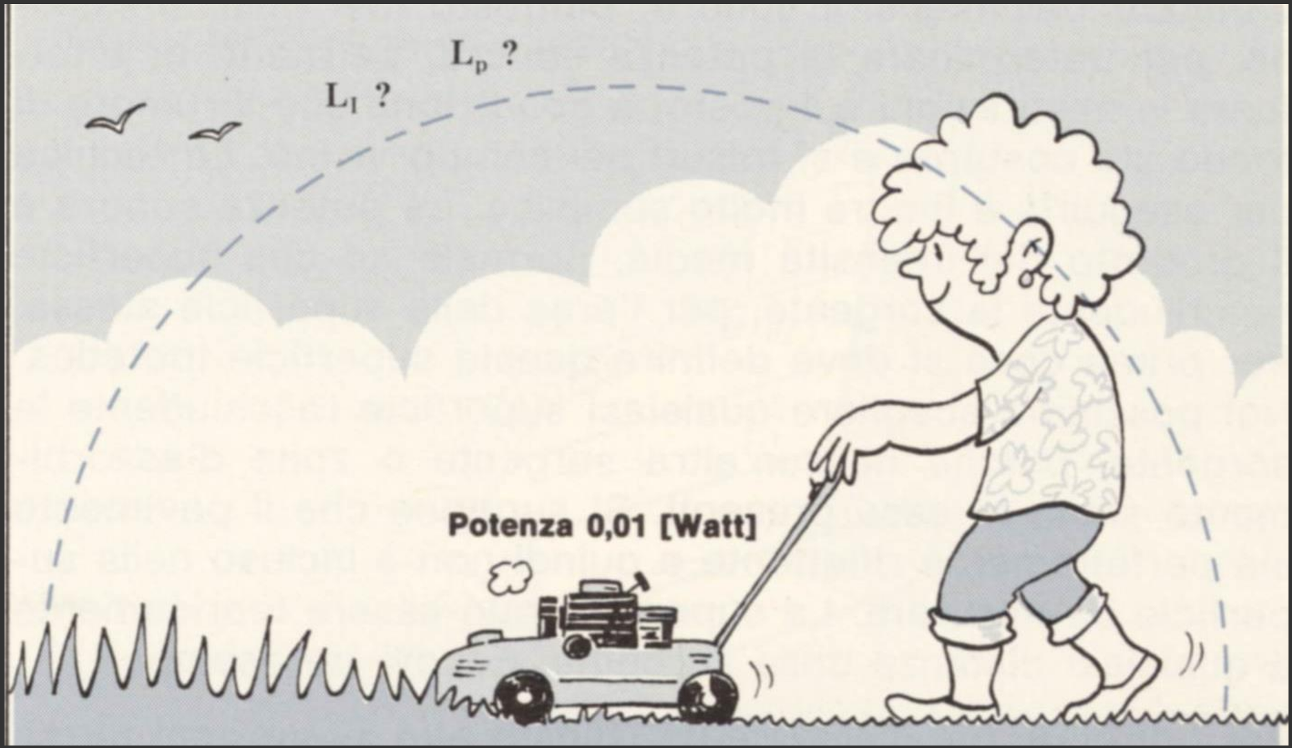
Alcuni numeri utili

- $10 \times \mathrm{Log}_{10}\ (2) =$ 3,01 ≅ 3,0 $\qquad 10 \times \mathrm{Log}_{10}\ (3) =$ 4,77 ≅ 4,8
- $10 \times \mathrm{Log}_{10}\ (5) =$ 6,99 ≅ 7,0 $\qquad 10 \times \mathrm{Log}_{10}\ (10) =$ 10,00

Applicazione 1

dati
Tagliaerba 0.01W
$r = 1.5$ m

$L_I = ?$
$L_p = ?$



$S = 2\pi r^2 = 14 m^2$,
$I = W/S = 0.01/14 = 0.00071\ W/m^2$
$L_I = 10\log(I/I_o) = 88.53$ dB

$I = p^2/\rho c$,
$p^2 = I\ \rho c = 0.00071 \cdot 400 = 0.234$
$p = 0{,}5329$ N
$L_p = 20\log(p/p_o) = 88{,}51$ dB

Effetto di due sorgenti

In presenza di due suoni non si possono sommare algebricamente i livelli, si possono invece sommare le pressioni:

$$p_{tot}(t)=p_1(t)+p_2(t)$$

$$p^2_{medio,tot} = \frac{1}{T}\int_0^T [p_1(t)+p_2(t)]^2 dt$$

$$p_{medio,\ tot}^{2}=p_{1medio}^{2}+2(p_1p_2)_{medio}+p_{2medio}^{2}$$

due onde nella maggior parte dei casi sono incoerenti per cui la media nel tempo del prodotto p_1p_2 vale zero:

$$p_{medio,\ tot}^{2}=p_{1medio}^{2}+p_{2medio}^{2}$$

Due sorgenti uguali

$$p_{medio,\ tot}^{2}=p_{1medio}^{\ 2}+p_{2medio}^{2}=2p_{1medio}^{\ 2}$$

$$L_p= 10\log(p_{tot}^2/p_o^2)= 10\log(2p_1^2/p_o^2)= 10\log(p_1^2/p_o^2)+ 10\log(2) = L_{p1}+3$$

Nel caso in cui l’assunzione di *due onde non correlate* sia non accettabile, Il prodotto p_1p_2 non vale zero. Si ha interferenza.

Nel caso di ***interferenza distruttiva*** si ha:

$$p_{tot}(t)=p_1(t)+p_2(t)= p_1(t)-p_1(t)=0$$

$$L_p = -\infty$$

Nel caso di ***interferenza costruttiva*** si ha:

$$p_{medio,\ tot}^{2}=p_{1medio}^{\ 2}+2(p_1p_2)_{medio}+p_{2medio}^{2}=4p_{1medio}^{\ 2}$$

$$L_p= 10\log(p_{tot}^2/p_o^2)= 10\log(4p_1^2/p_o^2)= 10\log(p_1^2/p_o^2)+ 10\log(4) = L_{p1}+6$$

Due sorgenti qualsiasi

L’effetto complessivo di diverse sorgenti di diverso livello e stessa frequenza si può valutare a partire dalle relative pressioni efficaci

$$p_{medio,\ tot}^{2}=p_{1medio}^{\ 2}+p_{2medio}^{2}$$

$$p_1^2=p_0^{\ 2}10^{(L_{p1}/10)} \qquad p_2^2=p_0^{\ 2}10^{(L_{p2}/10)}$$

$$p_1^2+p_2^2=p_0^{\ 2}\,(10^{(L_{p1}/10)}+10^{(L_{p2}/10)})$$

$$L_{ptot}=10\log\,[p_0^{\ 2}\,(10^{(L_{p1}/10)}+10^{(L_{p2}/10)})/\,p_0^{\ 2}]$$

$$L_{ptot}=10\log\,[\,(10^{(L_{p1}/10)}+10^{(L_{p2}/10)})]$$

Applicazione 2

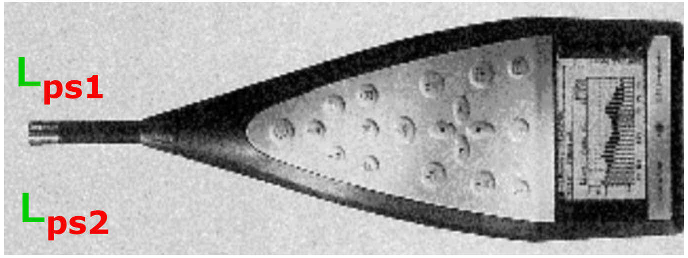
Dati:

$S_1 = S_2$; $L_{ws} = 100$ dB

$r_1 = r_2 = 10$ m

S_1

r_1



r_2

S_2

1) $L_{ps1} = L_{ps2}$?

2) L_{ps1} = ? dB

3) $L_{p(S1 + S2)}$ = ? dB

Applicazione 2

1, 2) $Lws = Lps + 20\ Log_{10}\ (r) + 10\ Log_{10}\ (Q) + 11$

2) $Lps_1 = Lws_1 - 20\ Log_{10}\ (r_1) + 3 - 11 = 100 - 20 + 3 - 11 = 72\ dB$

3) $Lps_1 = Lws_1 - 20\ Log_{10}\ (r_1) + 3 - 11$

3) $Lps_2 = Lws_2 - 20\ Log_{10}\ (r_2) + 3 - 11$

3) $Lps_1 + Lps_2 = Lws_1 + Lws_2 - 20\ Log_{10}\ (r_1) - 20\ Log_{10}\ (r_2) - 8 - 8$

3) $Lps_1 + Lps_2 = 100 + 100 - 20 - 20 - 8 - 8 = 144\ dB$

3) $W_1 = p_1^2 \times 2 \pi r_1^2 / (\rho c)$ $\quad W_2 = p_2^2 \times 2 \pi r_2^2 / (\rho c)$

3) $W_{tot} = W_1 + W_2 = 2\ W_1 = 2\ [\ p_1^2\ 2 \pi r_1^2 / (\rho c)\ ] = 2\ p_1^2\ 2 \pi r_1^2 / (\rho c)$

3) $10\ Log_{10}\ W_{tot}/W_o = 10\ Log_{10}\ (p_1 / p_0)^2 + 10\ Log_{10}\ (2 \pi r_1^2) + 10\ Log_{10}\ (2)$

3) $Lws = Lps_1 + 20\ Log_{10}\ (r_1) + 8 + 3$

3) $Lps_{(S1 + S2)} = Lps_1 + 3\ dB = 72 + 3\ dB$

- **Il raddoppio o il dimezzamento della potenza sonora aumenta o riduce il livello di pressione L_p di 3 dB**

Applicazione 3

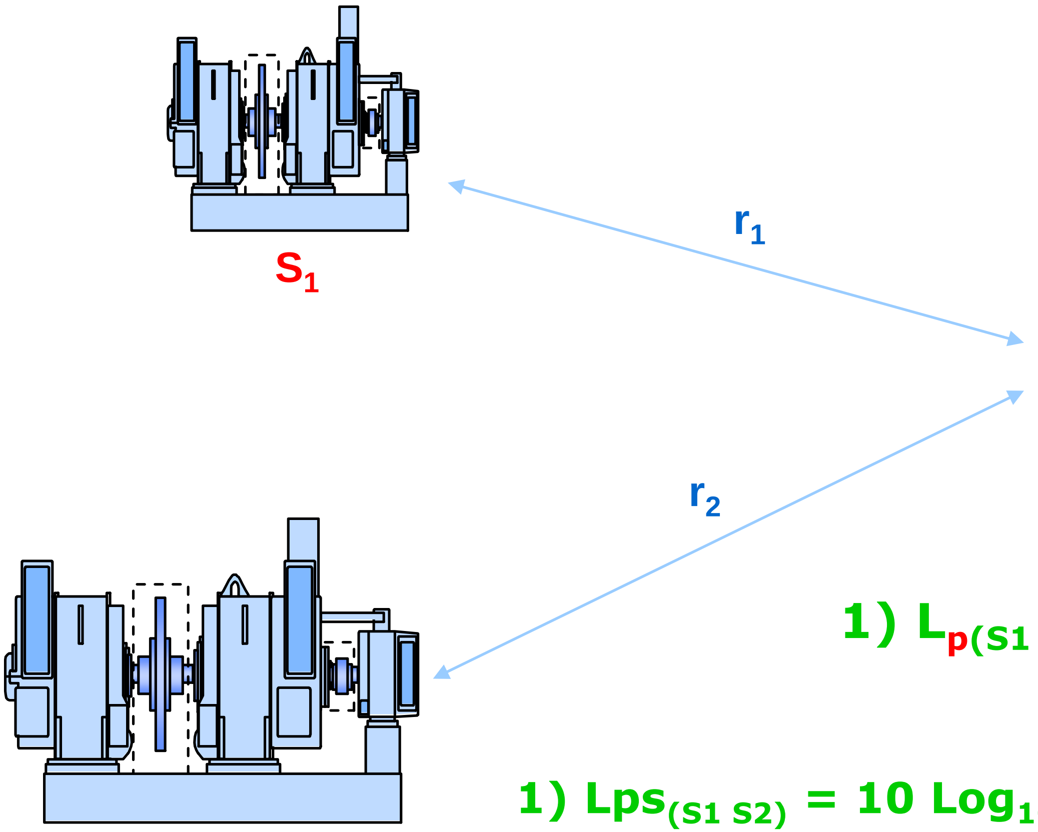
Dati:

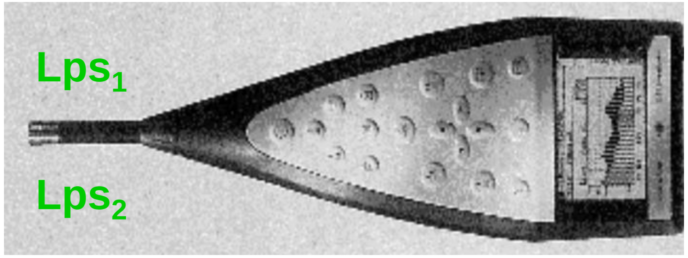
$Lps_1 = 78 \text{ dB}$

$Lps_2 = 88 \text{ dB}$

$S_1 \neq S_2$

$r_1 = r_2 = 10 \text{ m}$





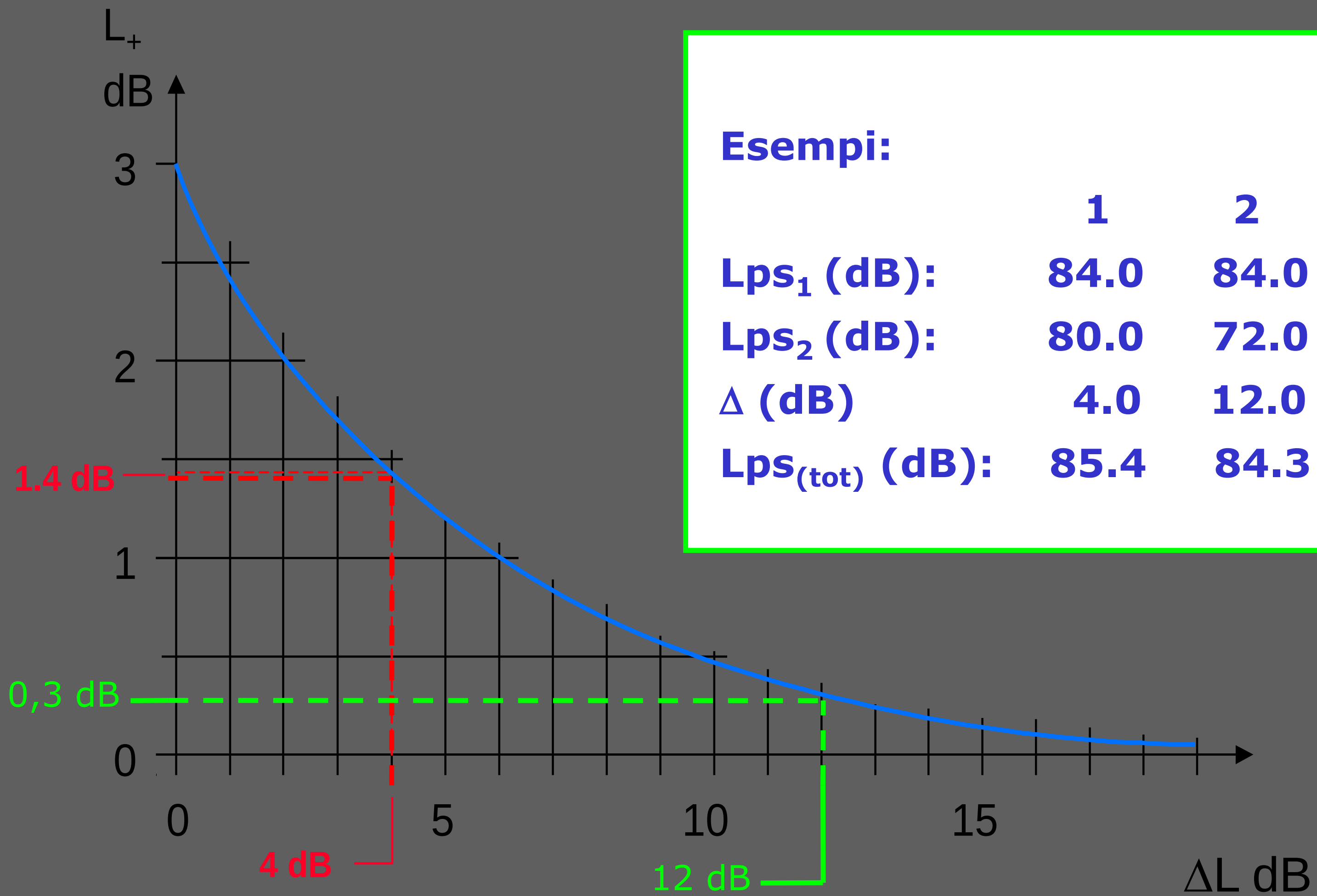
1) $L_{p(S1\,+\,S2)} = \quad ? \quad \text{dB}$

$$1)\ Lps_{(S1\ S2)} = 10 \operatorname{Log}_{10} (10^{(Lps1/10)} + 10^{(Lps2/10)})$$

$$= 10 \operatorname{Log}_{10} (10^{7.8} + 10^{8.8})$$

$$= 88.4 \text{ dB} \cong 88 \text{ dB}$$

Somma di livelli



Esempi:

	1	2
Lps_1 (dB):	84.0	84.0
Lps_2 (dB):	80.0	72.0
Δ (dB)	4.0	12.0
$Lps_{(tot)}$ (dB):	85.4	84.3

Quando due valori differiscono per più di 10 dB si può considerare trascurabile l'influenza di quello inferiore