

# Intensità di un suono

Prof. Farabegoli Giorgio



I.T.T. “Marie Curie” di Savignano sul Rubicone (FC)

**[g.farabegoli@libero.it](mailto:g.farabegoli@libero.it)**

# Misure del livello sonoro – scala dei dB

- Le potenze e le intensità sonore associate alla percezione dell'orecchio umano hanno un'ampia dinamica.
- In musica, il termine dinamica riguarda le intensità sonore (piano, forte, e gradazioni superiori e intermedie) con cui il compositore intende che il brano sia eseguito, e che annota in partitura.
- La dinamica viene annotata sotto il pentagramma con apposite sigle, chiamate segni dinamici.
- I segni dinamici vanno, dalla minima alla massima dinamica: **ppp** (più che pianissimo), **pp** (pianissimo), **p** (piano), **mp** (mezzopiano), **mf** (mezzoforte), **f** (forte), **ff** (fortissimo), **fff** (più che fortissimo).

*mf* mezzo forte = medium loud (pronounced "MET-soh FOR-tay")

*f* forte = loud ("FOR-tay")

*ff* fortissimo = very loud ("for-TISS-im-oh")

*fff* fortississimo = very, very loud (FOR-tiss-SISS-im-oh)

*ffff* and so on

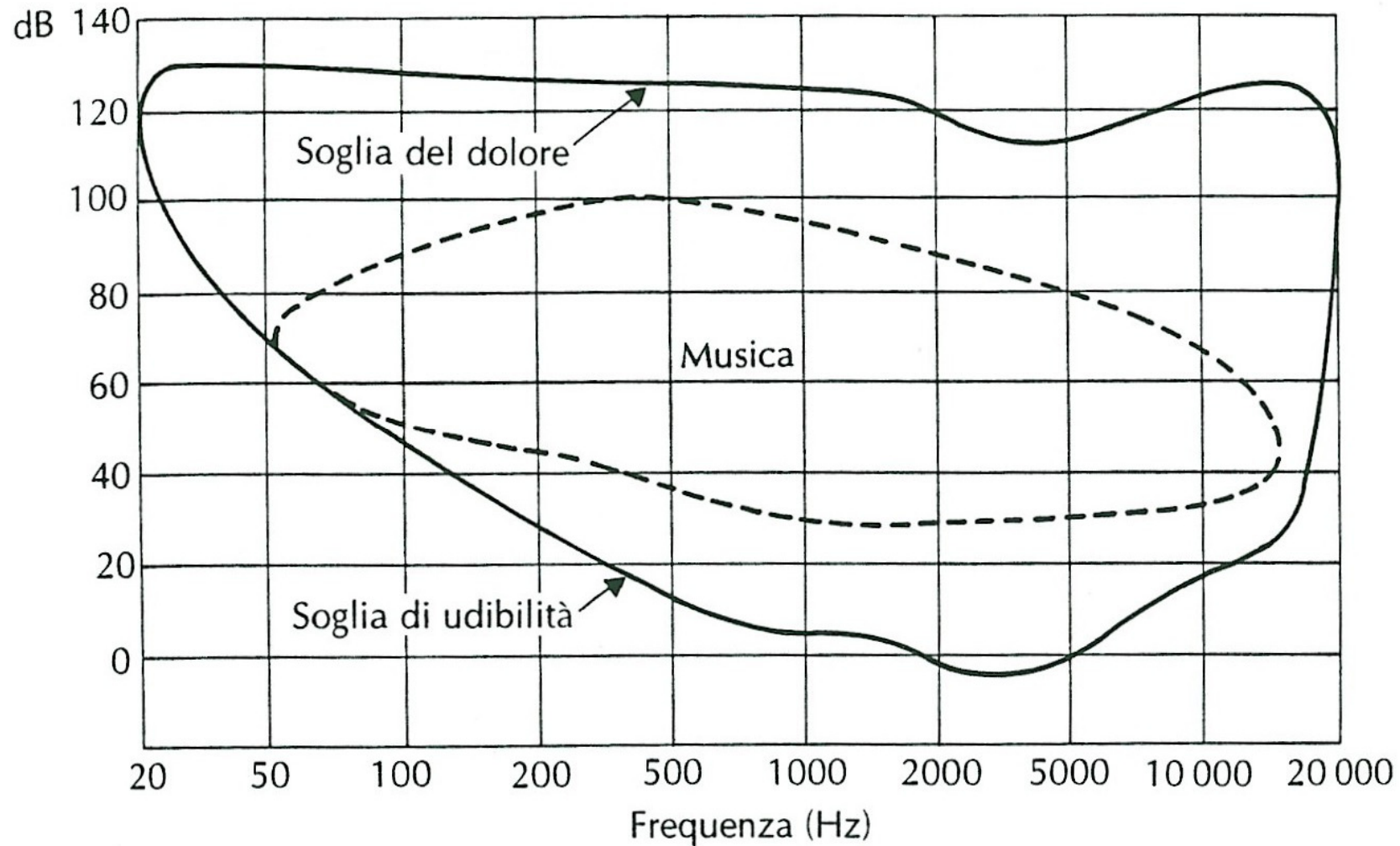
*mp* mezzo piano = medium soft ("MET-soh PYAN-oh")

*p* piano = soft (PYAN-oh)

*pp* pianissimo = very soft ("PEE-an-ISS-im-oh")

*ppp* pianississimo = very, very soft ("PEE-an-iss-SISS-im-oh")

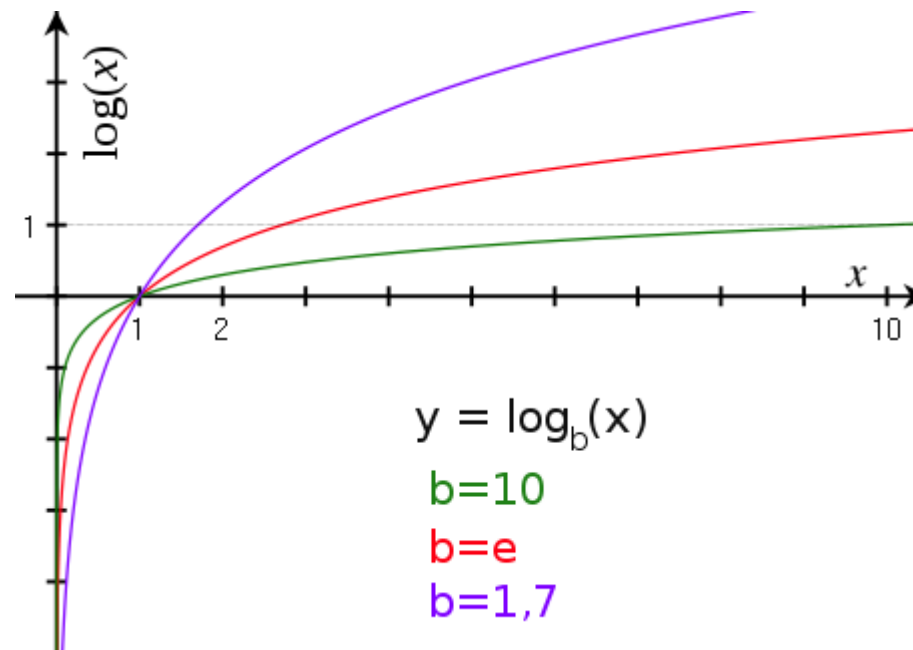
*pppp* and so on

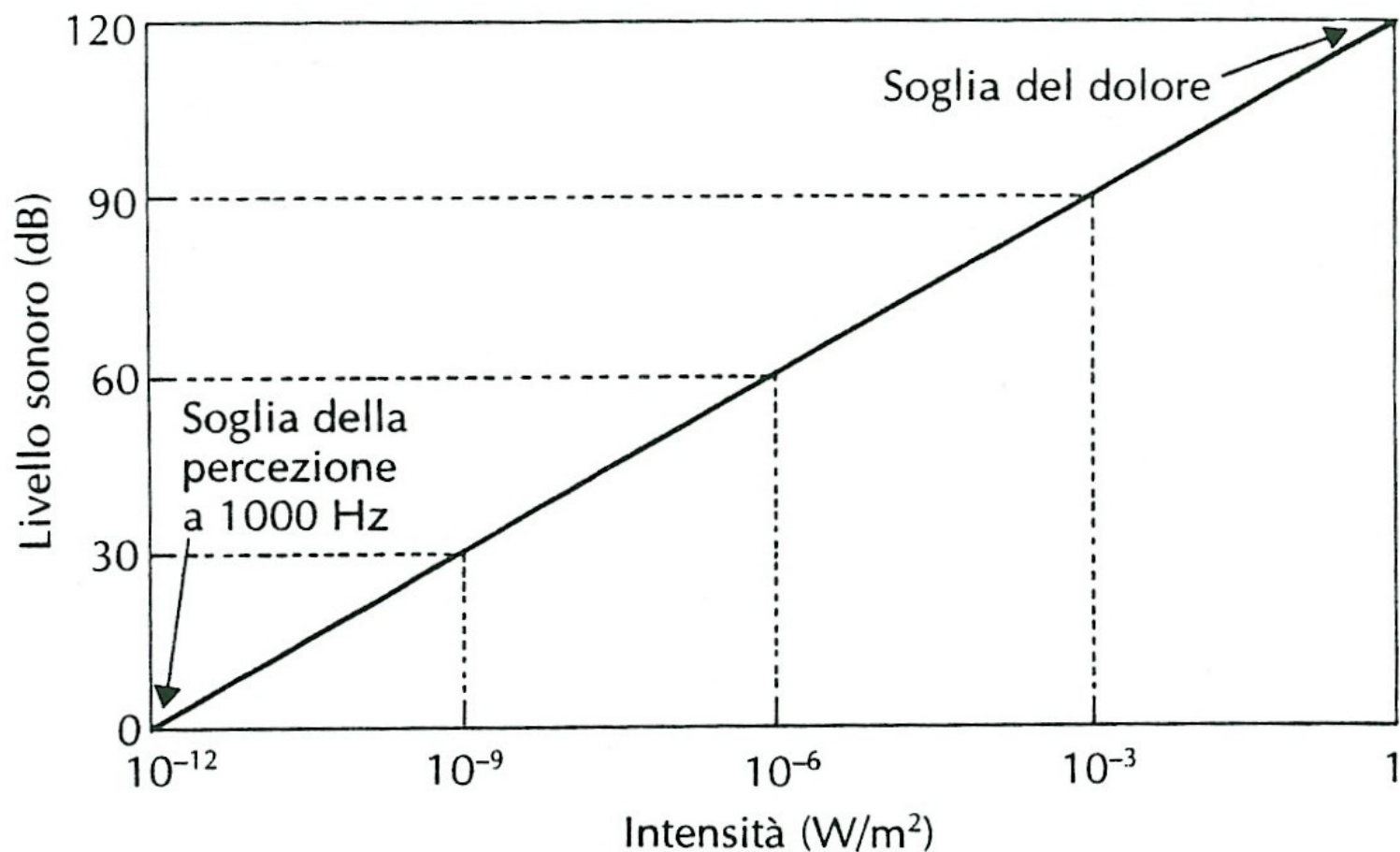


- Campi di azione in frequenza e potenza sonora della musica e dell'apparato uditivo umano (figura tratta dal testo "Fisica nella musica" di Andrea Frova).

- Potenze sonore  $W$ : vanno da 1 pW (soglia dell'udibile) a 1 W (soglia del dolore).
- Pressioni sonore  $p$ : vanno da 20  $\mu$ Pa (soglia dell'udibile) a 20 Pa (soglia del dolore).
- Intensità sonore  $I$ : vanno da 1 pW/m<sup>2</sup> (soglia dell'udibile) a 1 W/m<sup>2</sup> (soglia del dolore).
- Per questo motivo si fa uso di una scala logaritmica, in cui, al valore della grandezza in esame, si fa corrispondere il logaritmo del rapporto tra quello stesso valore ed un valore di "riferimento".

Il vantaggio che deriva dall'uso della scala del **decibel** consiste nella evidente riduzione del campo di variabilità  $\Rightarrow$  riduzione della dinamica.





- Livello di intensità sonora espresso logicamente (scala in decibel) a fronte del suo valore in  $\text{W/m}^2$  (figura tratta dal testo “Fisica nella musica” di Andrea Frova).

<i>Suono al limite della percettibilità</i>	0 dB
Zanzara vicino all'orecchio	10
Fruscio di foglie	10
Bisbiglio (a 1 m)	15
Teatro o chiesa (vuoti)	25-30
Rumore di fondo notturno in città	30
Ufficio o ristorante (quieti)	50-55
Stadio	55
Conversazione (a 1 m)	50
Ufficio o ristorante (affollati)	60-65
Traffico cittadino diurno	70-80
Martello pneumatico (a 3 m)	90
Fortissimo ( <i>fff</i> ) di grande orchestra in sala	100
Urlo (a 1,5 m)	100
Gruppo rock in un locale chiuso	110
Schianto di fulmine	110
Martello su acciaio (a 0,5 m)	115
<i>Suono al limite del dolore</i>	120
Jet al decollo (a 50 m)	130
Rottura del timpano	160
Missile al decollo (a 50 m)	200
Massimo rumore prodotto in laboratorio	210

- Esempi di livelli sonori in dB rilevati da un fonometro (figura tratta dal testo “Fisica nella musica” di Andrea Frova).

1) Si definisce **livello di pressione sonora SPL o  $L_p$**  (quello rilevato dagli strumenti di misura) la quantità:

- $$\text{SPL} = L_p = 10 \log p^2/p_{\text{rif}}^2 = 20 \log p/p_{\text{rif}} \quad (\text{dB}), \text{ dove } p_{\text{rif}} = 20 \mu\text{Pa}$$

2) Si definisce **livello di intensità sonora  $L_I$**  la quantità:

- $$L_I = 10 \log I/I_{\text{rif}} \quad (\text{dB}), \text{ dove } I_{\text{rif}} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

3) Si definisce infine **livello di potenza sonora SWL o  $L_w$**  la q

- $$\text{SWL} = L_w = 10 \log I/I_{\text{rif}} \quad (\text{dB}), \text{ dove } W_{\text{rif}} = 10^{-12} \text{ W}$$

Nel caso di onde sonore sferiche o piane (spazio libero), si ha:

- $$L_p = L_I$$

Se invece si hanno riflessioni delle onde, la pressione sonora in un punto è dovuta al contributo di più onde, aventi direzioni diverse,  $L_p$  può differire da  $L_I$  di qualche dB.

Mentre i 2 livelli di livello di pressione sonora  $L_p$  e livello di intensità sonora  $L_I$ , nel caso di onda sferica o piana, si identificano in un unico valore numerico, il livello di potenza assume, generalmente, un valore diverso, solitamente molto maggiore!

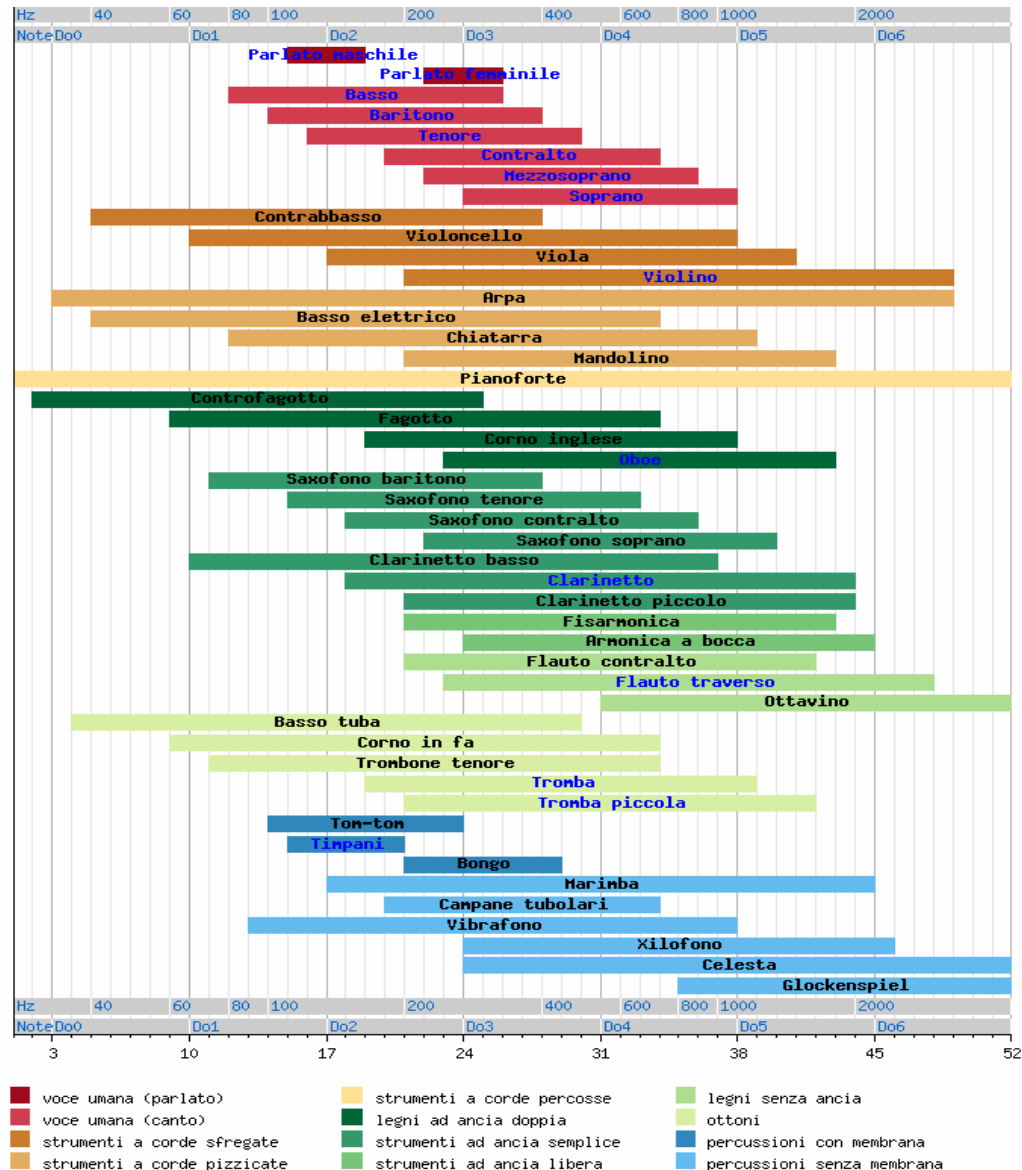
Nel caso di onda piana e progressiva, il legame fra livello di potenza e livello di intensità è:

- $L_W = L_I + 10 \log S/S_o = L_I + 10 \log S$  (dB), dove  $S_o = 1 \text{ m}^2$

Questa relazione, in realtà, è sempre vera, anche nel caso di altri tipi di onde, purchè la superficie  $S$  considerata rappresenti l'intera superficie attraverso cui la potenza emessa fuoriesce dalla sorgente.

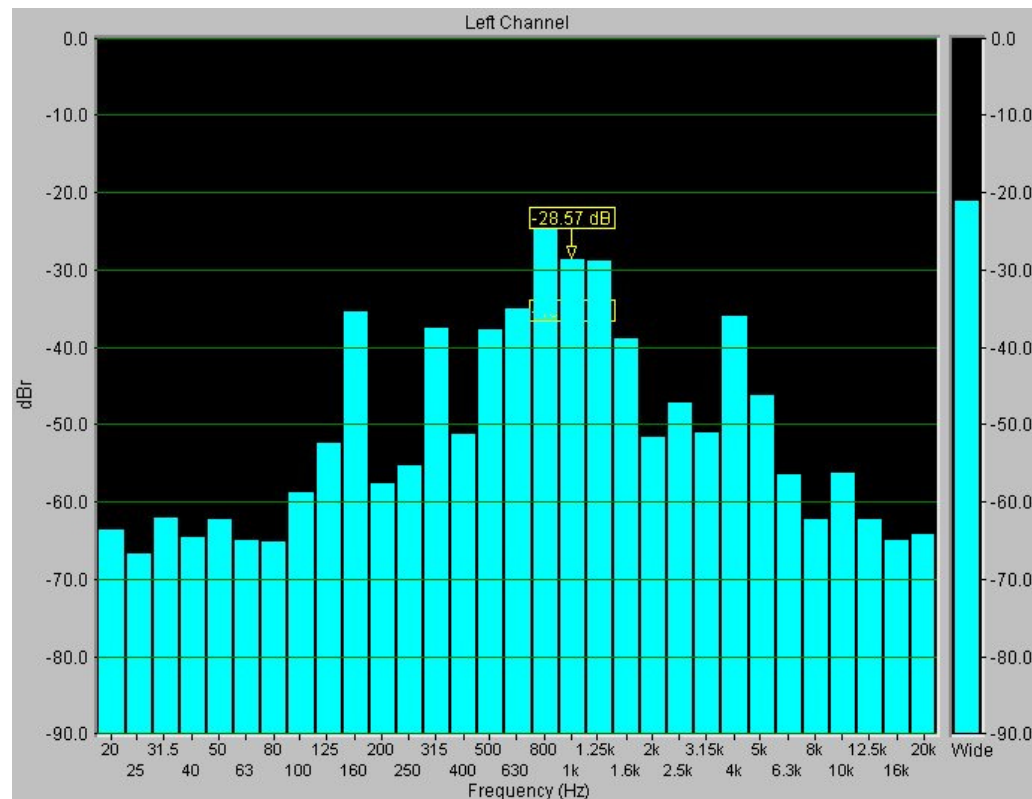
# Livelli del suono nella musica: singoli strumenti

- La tabella mostra le estensioni approssimative di alcuni strumenti musicali.
- Ogni strumento non produce un tono puro, ma un largo spettro di suoni armonici, differente per ogni nota.



- Le estensioni della tabella precedente si riferiscono alla fondamentale prodotta dagli strumenti, e non all'intero spettro; se consideriamo l'intero spettro possiamo osservare che gli armonici più acuti prodotti da quasi tutti gli strumenti, incluse le voci, raggiungono facilmente il limite della gamma udibile.

Questo spiega perché, ai fini della registrazione e riproduzione sonora, si possa ottenere un'alta fedeltà soltanto utilizzando una larghezza di banda appropriata (cioè fino a 20000-22000 Hz).



Esempio di spettro della voce umana, tratto dalle dispense in PowerPoint del corso di “Acustica applicata” di Farina Angelo. 10

<i>Strumento</i>	<i>Potenza massima in uscita (W)</i>	<i>Livello di intensità (dB)</i>
Clarinetto	0,05	86,5
Corno	0,05	86,5
Flauto	0,06	87
Voce femminile	0,09	89
Voce maschile	0,14	91
Chitarra	0,14	91
Oboe	0,18	92
Violino	0,18	92
Contrabbasso	0,18	92

<i>Strumento</i>	<i>Potenza massima in uscita (W)</i>	<i>Livello di intensità (dB)</i>
Fagotto	0,18	92
Tuba	0,20	92,5
Clarinetto (bassi)	0,36	95
Tromba	0,50	96,5
Pianoforte	1,1	100
Trombone	6	107
Organo	18	112
Timpani	25	113,5
Orchestra	70	118

- Potenza massima emessa da alcuni strumenti musicali, e corrispondenti livelli in dB delle intensità sonore rilevate all'aperto (campo libero) a 3 metri di distanza (figura tratta dal testo "Fisica nella musica" di Andrea Frova).

## Esempi di livelli del suono nella musica: singoli strumenti e orchestra

- Dai valori della tabella precedente, si determina il livello di intensità sonora di un violino a 1 m e a 20 metri di distanza (più o meno la distanza del punto di ascolto in platea di un'orchestra):

$$L_{11m} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{\frac{P}{4\pi R^2}}{10^{-12} \frac{W}{m^2}} \right) \cong 10 \log \left( \frac{0,18}{4\pi 1^2 \cdot 10^{-12}} \right) \cong 101,6 \text{ dB}$$

$$L_{120m} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{\frac{P}{4\pi R^2}}{10^{-12} \frac{W}{m^2}} \right) \cong 10 \log \left( \frac{0,18}{4\pi 20^2 \cdot 10^{-12}} \right) \cong 75,5 \text{ dB}$$

- Livello di intensità sonora ricavato precedentemente per un violino a circa 20 metri di distanza: 75,5 dB.
- Ora si può determinare il livello di intensità sonora prodotto a 20 metri di distanza (punto di ascolto in platea di un'orchestra) da un'orchestra composta da 128 elementi che producono ciascuno lo stesso livello medio del violino pari a 75,5 dB:

$$L_{120m} = 75,5 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{I_{128 \text{ strumenti}}}{I_{1 \text{ strumento}}} \right) = 75,5 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{128}{1} \right) \cong 75,5 \text{ dB} + 21 \text{ dB} = 96,5 \text{ dB}$$

- Si nota che tale livello di intensità sonora di 96,5 dB, prodotto a 20 metri di distanza da un'ipotetica orchestra di 128 elementi, è circa pari al livello sonico di 100 phon presentato nella tabella seguente, al quale corrisponde un fortissimo orchestrale *fff*.

<i>Livello dinamico musicale</i>	<i>Intensità (W/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Livello sonico o sonia (phon)</i>	<i>Sonorità (son)</i>
<i>ffff</i>	$10^{-1}$	110	128
<i>fff</i>	$10^{-2}$	100	64
<i>ff</i>	$10^{-3}$	90	32
<i>f</i>	$10^{-4}$	80	16
<i>mf</i>	$10^{-5}$	70	8
<i>mp</i>	$10^{-6}$	60	4
<i>p</i>	$10^{-7}$	50	2
<i>pp</i>	$10^{-8}$	40	1
<i>ppp</i>	$10^{-9}$	30	0,4
<i>pppp</i>	$10^{-10}$	20	0,1

Alla frequenza di 1000 Hz, il livello sonico in phon non differisce dall'intensità sonora in decibel.

- Corrispondenza tra livello dinamico musicale, intensità del sonora, livello sonico in phon e sonorità percepita per un suono puro di frequenza 1000 Hz (figura tratta dal testo “Fisica nella musica” di Andrea Frova).

## Esempi sui vantaggi della scala in dB

- Il valore di intensità relativo alla soglia di udibilità è pari proprio a 0 dB: se sostituiamo all'intensità sonora  $I$  il valore della soglia di udibilità di  $I_{\min} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , otteniamo:

$$I_{\min}^{(\text{dB})} = 10 \log_{10} \left( \frac{I_{\min}}{I_{\min}} \right) = 10 \cdot \log_{10} 1 = 0 \text{ dB}$$

- Possibilità di rappresentare grandezze che presentano un grande campo di variazione, poiché nel caso dell'intensità sonora il campo di variazione è estremamente esteso.
- L'intensità sonora di un concerto di musica rock (prossimo alla soglia del dolore) è 1000 miliardi di volte più intensa ( $10^{12}$  volte più intensa) della soglia di udibilità. Se sostituiamo all'intensità sonora  $I$  il valore della soglia del dolore di  $I_{\max} = 10^{12} \times I_{\min} = 1 \text{ W/m}^2$ , otteniamo:

$$I_{\max}^{(\text{dB})} = 10 \log_{10} \left( \frac{10^{12} I_{\min}}{I_{\min}} \right) = 10 \cdot \log_{10} 10^{12} = 120 \text{ dB}$$

- A livello percettivo l'orecchio sembra rispondere, in maniera approssimativa, allo stimolo rappresentato dall'intensità sonora dell'onda seguendo una scala logaritmica.
  - Il volume sonoro percepito non è in relazione lineare con l'intensità: raddoppiando l'intensità del suono non si percepisce un suono di intensità doppia (qui entra in gioco la soggettività dei vari ascoltatori).
  - Esperimenti condotti su vari ascoltatori hanno mostrato che, per ottenere suoni di intensità percepita doppia, occorre aumentare di circa un fattore dieci l'intensità dell'onda sonora.



Esempio di suono puro di ampiezza crescente con progressione aritmetica: ad ogni secondo l'ampiezza aumenta di una quantità fissa pari all'ampiezza iniziale.



Esempio di suono puro di ampiezza crescente con progressione geometrica: ad ogni secondo l'ampiezza raddoppia.

- la scala in dB presenta il giusto livello di sensibilità.
- ciò viene ottenuto premettendo il fattore 10 al logaritmo del rapporto delle intensità; tale fattore è opportuno (dB vuol dire deciBel, cioè un decimo di Bel) in quanto il dB rappresenta, con buona approssimazione, la minima differenza di intensità tra due suoni che l'orecchio umano può percepire.
- Infatti l'orecchio umano coglie la differenza di intensità tra due suoni solo se il loro livello differisce per più di un dB (che senso avrebbe, infatti, avere unità di misura più piccole del decibel se poi l'orecchio non è in grado di apprezzare la differenza?).

In acustica si usano solitamente 2 tipi di scale in dB:

- 1) **dB(SPL)**: scala della pressione sonora relativa alla soglia di udibilità (20  $\mu$ Pa in aria, 1  $\mu$ Pa in acqua);
- 2) **dB(SWL)**: scala della potenza sonora relativa alla potenza di  $10^{-12}$  W.

## Esempio di calcolo del livello di intensità sonora in campo aperto (emissione sferica)

- Dati: potenza sorgente sonora 1 W; distanza dalla sorgente sonora  $R = 1$  m.

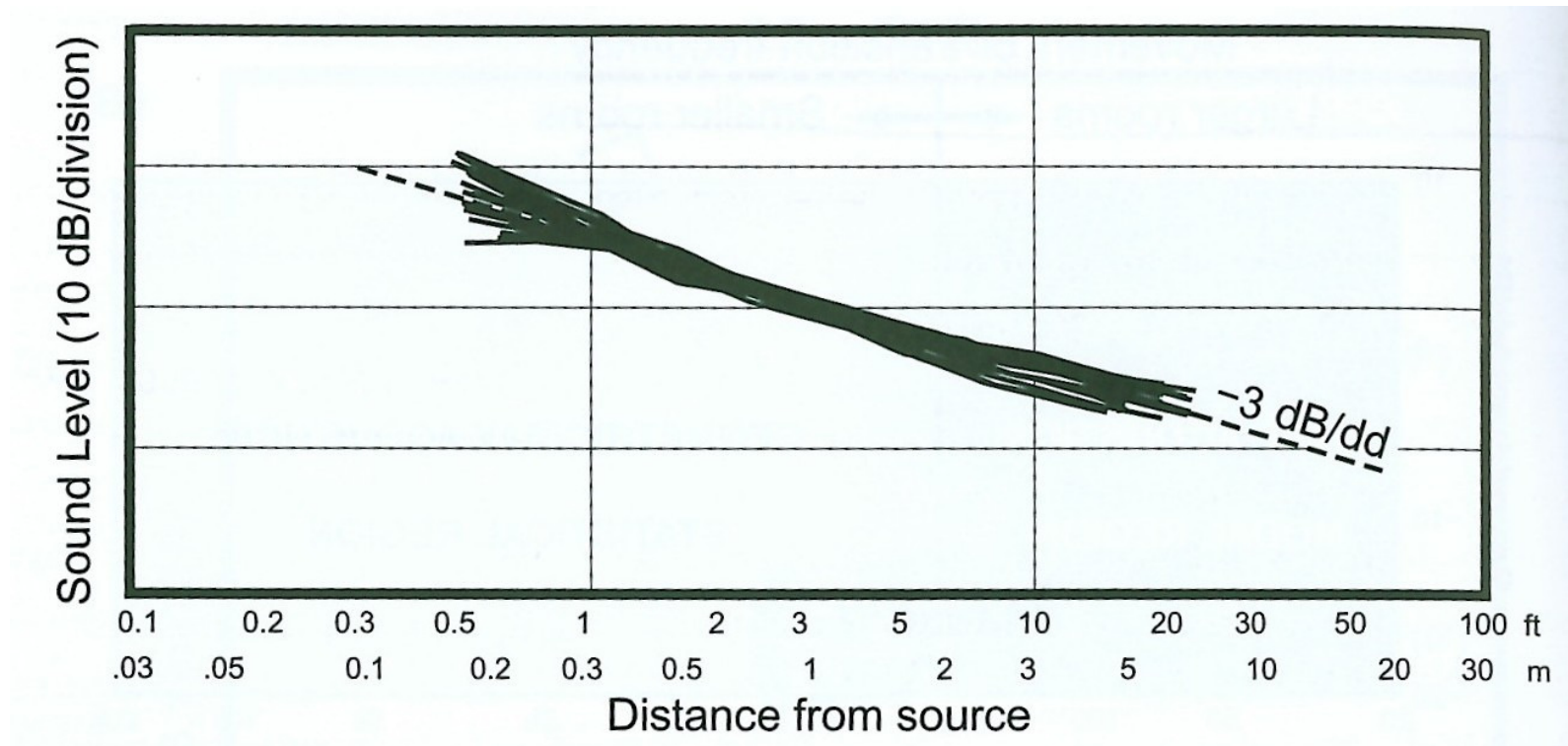
$$L_{I1m} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{P}{4\pi R^2 I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{1}{4\pi 1^2 10^{-12}} \right) \cong 109 \text{ dB}$$

- Dati: potenza sorgente sonora 1 W; distanza dalla sorgente sonora  $R = 2$  m.

$$L_{I2m} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{P}{4\pi R^2 I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{1}{4\pi 2^2 10^{-12}} \right) \cong 103 \text{ dB}$$

- Pertanto in campo aperto, al raddoppio della distanza dalla sorgente, il livello di intensità sonora diminuisce di 6 dB, ossia 4 volte.

## Esempio di calcolo del livello di intensità sonora in ambiente domestico (riflessioni pareti)



- Curve di diminuzione del livello di intensità sonora al raddoppio della distanza dalla sorgente ottenute in vari ambienti domestici (figura tratta dal testo “Sound reproduction” di Floyd E. Toole).

- Pertanto utilizzando le curve della figura della pagina precedente, ricaviamo nuovamente i livelli di intensità sonora in ambiente domestico (riflessioni sulle pareti).
- Dati: potenza sorgente sonora 1 W; distanza dalla sorgente sonora  $R = 1$  m.

$$L_{11m} = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{P}{4\pi R^2 I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{1}{4\pi 1^2 10^{-12}} \right) \cong 109 \text{ dB}$$

- Dati: potenza sorgente sonora 1 W; distanza dalla sorgente sonora  $R = 2$  m.

$$L_{12m} = L_{11m} - 3 \text{ dB} \cong 109 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 106 \text{ dB}$$

- Pertanto in ambiente domestico, grazie alle riflessioni delle onde sonore sulle pareti (campo riverberato), al raddoppio della distanza dalla sorgente, il livello di intensità sonora diminuisce di circa 3 dB, ossia 2 volte.

## Esempio di livello di intensità sonora di 2 differenti diffusori di hi-fi in ambiente domestico

- Caso 1: diffusori a bassa efficienza Rogers LS3/5a, sensibilità 83 dB/1W·1m, prezzo € 2469,00.



- Una coppia di diffusori Rogers LS3/5a, pilotati da un amplificatore da 1 W + 1 W, produce un livello di intensità sonora a 1 metro di distanza in ambiente domestico:

$$L_{I_{1m}} = 83 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{I_{2W}}{I_{1W}} \right) = 83 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{\frac{2W}{4\pi R^2}}{\frac{1W}{4\pi R^2}} \right) = 83 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{2W}{1W} \right) \cong 83 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 86 \text{ dB}$$

- La stessa coppia di diffusori Rogers LS3/5a, pilotati da un amplificatore da 100 W + 100 W, produce un livello di intensità sonora a 1 metro e a 4 metri (punto di ascolto) di distanza in ambiente domestico:

$$L_{I_{1m}} = 83 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{I_{200W}}{I_{1W}} \right) = 83 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{200W}{1W} \right) \cong 83 \text{ dB} + 23 \text{ dB} = 106 \text{ dB}$$

$$L_{I_{4m}} = 106 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 100 \text{ dB}$$

## Esempio di livello di intensità sonora di 2 differenti diffusori di hi-fi in ambiente domestico

- Caso 2: diffusori ad altissima efficienza Klipsch Klipschorn, sensibilità 104 dB/1W·1m, prezzo € 18000,00.



- Una coppia di diffusori Klipsch Klipschorn, pilotati da un amplificatore da 1 W + 1 W, produce un livello di intensità sonora a 1 metro di distanza in ambiente domestico:

$$L_{I_{1m}} = 104 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{I_{2W}}{I_{1W}} \right) = 104 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{2W}{1W} \right) \cong 104 \text{ dB} + 3 \text{ dB} = 107 \text{ dB}$$

- La stessa coppia di diffusori Klipsch Klipschorn, pilotati da un amplificatore da 100 W + 100 W, produce un livello di intensità sonora a 1 metro e a 4 metri (punto di ascolto) di distanza in ambiente domestico:

$$L_{I_{1m}} = 104 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{I_{200W}}{I_{1W}} \right) = 104 \text{ dB} + 10 \log \left( \frac{200W}{1W} \right) \cong 104 \text{ dB} + 23 \text{ dB} = 127 \text{ dB}$$

$$L_{I_{4m}} = 127 \text{ dB} - 3 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 121 \text{ dB}$$

# L'intensità sonora percepita o livello sonico (loudness)

- Il livello d'intensità sonora  $L_I$  (dB) è una grandezza fisica che misura oggettivamente il flusso di energia trasportata dall'onda sonora.
- Tale grandezza però non descrive correttamente la sonorità soggettivamente percepita (in inglese **loudness**), poichè essa dipende in modo decisivo dalla frequenza del suono.
- Un esempio di ascolto di suono di frequenza crescente con continuità (da 20 Hz a 20000 Hz):



## Esempio di suono di intensità costante e frequenza crescente.

L'intensità percepita sembra variabile, a causa della dipendenza della sonorità soggettivamente percepita in relazione alla frequenza del suono emesso.

L'esperienza di ascolto precedente fornisce i seguenti risultati:

- 1) la sonorità percepita aumenta sensibilmente per le frequenze centrali (spesso si è costretti ad abbassare il volume per sopportare il suono a tali frequenze).
- 2) se si regola il volume in modo da sopportare il suono anche a tali frequenze, ripetendo l'ascolto si osserva che sia le alte frequenze sia, più marcatamente, le basse frequenze diventano praticamente inudibili.

La sonorità soggettivamente percepita non presenta quindi un legame diretto con l'intensità sonora oggettiva!

Per descrivere in maniera adeguata tale legame si ricorre alla sua rappresentazione mediante curve isofoniche che riportano, al variare della frequenza, i punti per i quali la sonorità percepita è costante.

Esse vengono ottenute chiedendo all'ascoltatore, mentre ascolta suoni di diversa frequenza, di regolare la manopola del volume in modo da percepirli con la stessa intensità!

# Curve isofoniche di Fletcher e Munson (1933)

- Sono le curve isofoniche che appaiono più frequentemente nella letteratura tecnica acustica.
- Ciascuna di tali curve corrisponde ad un uguale sensazione sonora soggettivamente percepita al variare della frequenza, espressa in **phon**.
- Sull'asse delle ascisse abbiamo le frequenze da 20 Hz a 20000 Hz, sull'asse delle ordinate abbiamo l'effettivo livello di pressione sonora in dB.
- Il livello sonico soggettivamente percepito (loudness) espresso in phon è assunto coincidente con il livello oggettivo di pressione sonora SPL per un suono puro alla frequenza di 1000 Hz.
- Per suoni di frequenza diversa da 1000 Hz, il livello sonico in phon è preso uguale a quello di un suono puro a 1000 Hz che produce una pari sensazione di volume sonoro.
- Esempio: quando un suono di  $SPL = 70$  dB appare altrettanto sonoro di uno a 1000 Hz di  $SPL = 60$  dB, si dice che il suo livello sonico è pari a 60 phon.

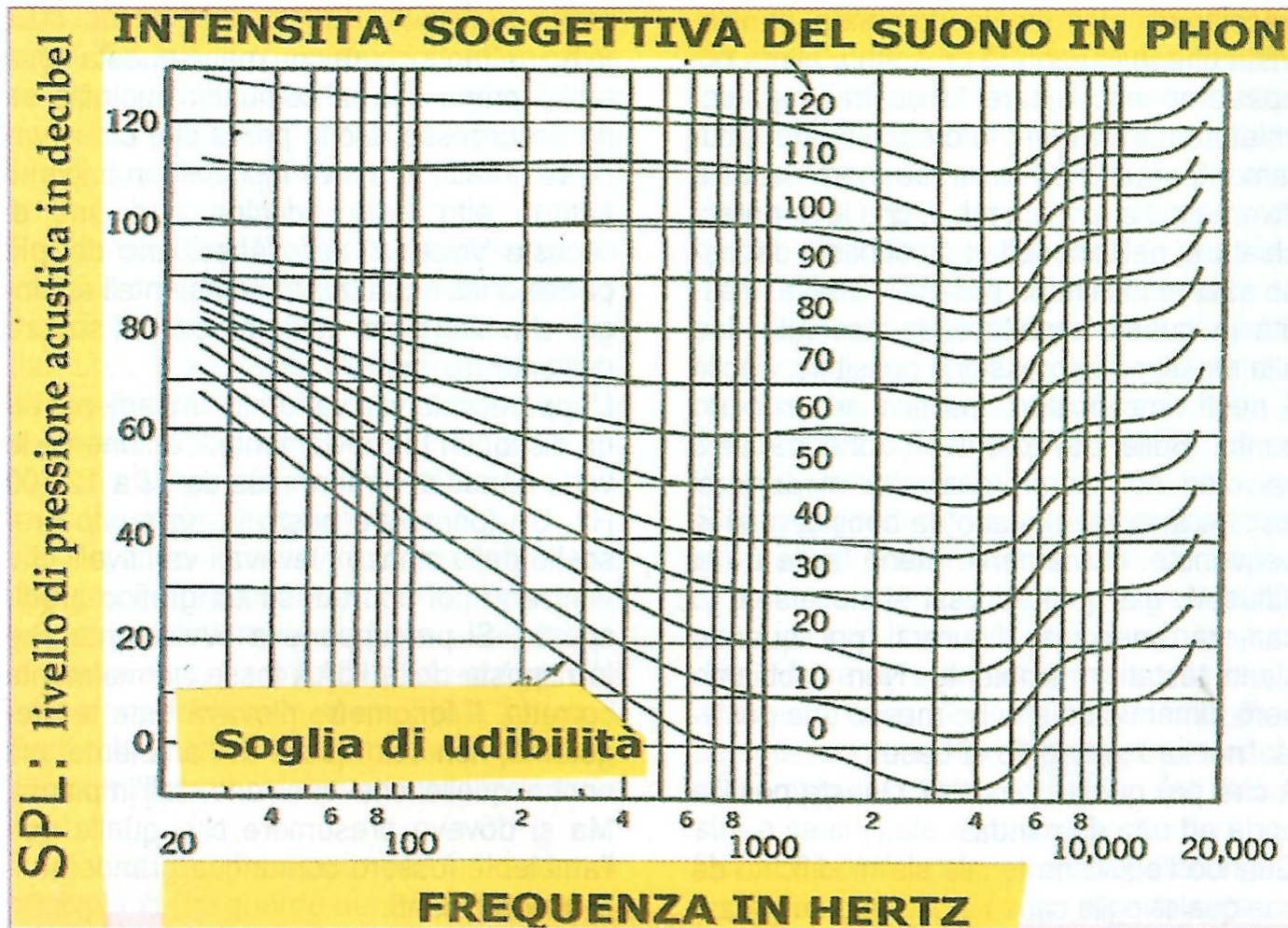


Figura 01 - L'audiogramma normale medio di Fletcher e Munson costituito dalle curve isofoniche in funzione della frequenza del suono. Il livello sonico percepito (sonia) espresso in phon, è indicato accanto a ciascuna curva. Notare che, per un suono a 1.000 Hz, i valori in dB e Phon sono coincidenti.

(figura tratta dalla rivista Costruire Hi-Fi n° 119, articolo di Bartolomeo Aloia).

# Esempi applicativi sulle curve di Fletcher e Munson

- ESEMPIO 1: curve dei livelli sonici di 90 e 100 phon.

Nel diagramma di Fletcher e Munson tali curve si mantengono, dai 1000 Hz verso sinistra, quasi sovrapposte alle linee orizzontali rispettivamente dei 90 e 100 dB fin quasi ai 30 Hz.....pertanto ai livelli di 90 e 100 dB la risposta tra 30 Hz e 1000 Hz risulta assolutamente lineare!

- Pertanto ad un livello di pressione sonora di 90 o 100 dB, l'orecchio umano, prendendo in esame queste curve, risulta abbastanza lineare, ossia non c'è praticamente differenza di percezione, nell'intervallo di frequenze tra 30 Hz e 1000 Hz!
- ESEMPIO 2: curva del livello sonico di 60 phon.

Seguendo tale curva dai 1000 Hz verso sinistra, alla frequenza di 30 Hz sull'asse verticale dell'SPL troviamo circa 84 dB, con una perdita di sensibilità di ben 24 dB!

# Esempio 1: curve dei 90 e 100 phon

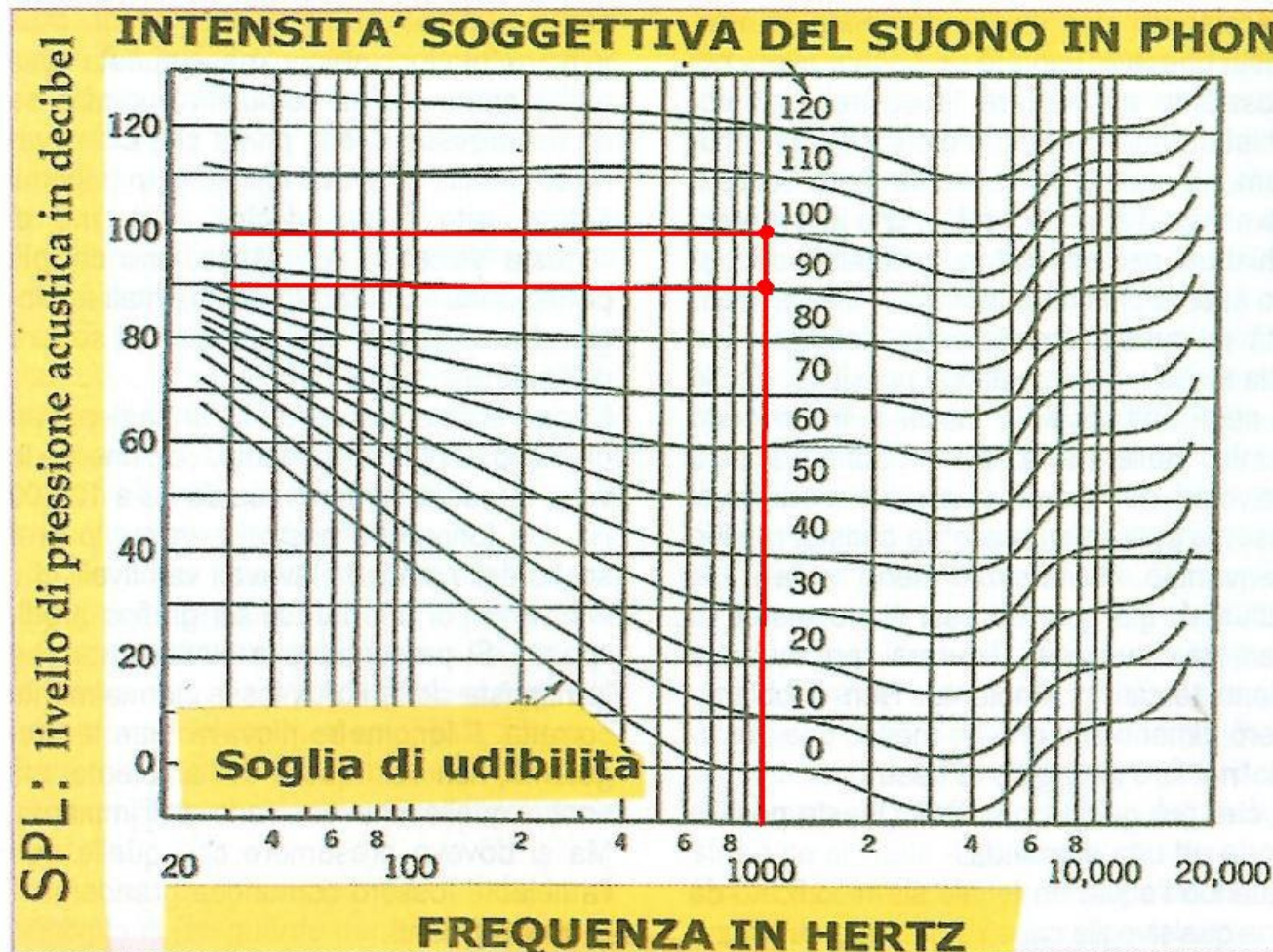


Figura 01 - L'audiogramma normale medio di Fletcher e Munson costituito dalle curve isofoniche in funzione della frequenza del suono. Il livello sonico percepito (sonia) espresso in phon, è indicato accanto a ciascuna curva. Notare che, per un suono a 1.000 Hz, i valori in dB e Phon sono coincidenti.

## Esempio 2: curva dei 60 phon

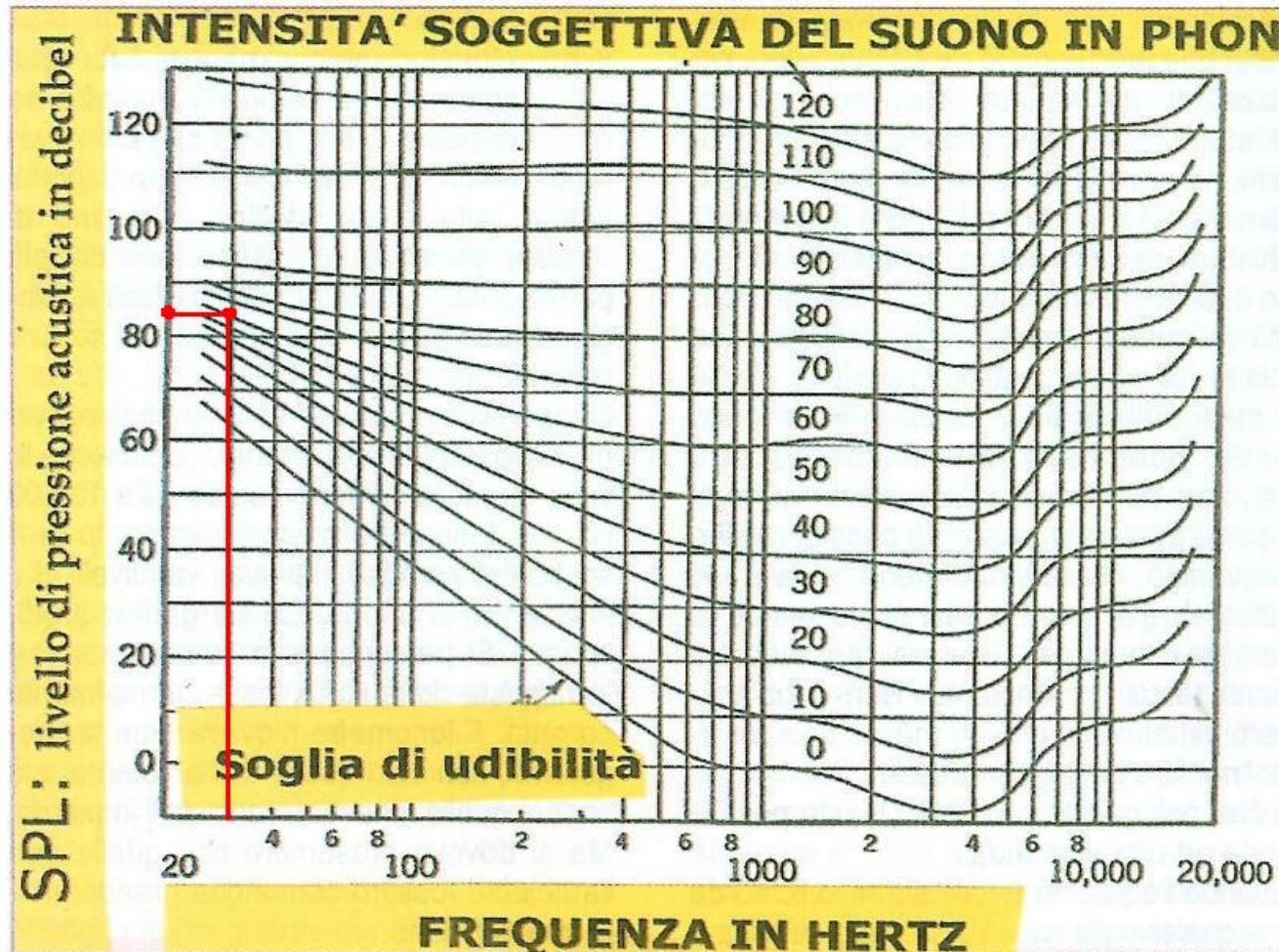


Figura 01 - L'audiogramma normale medio di Fletcher e Munson costituito dalle curve isofoniche in funzione della frequenza del suono. Il livello sonico percepito (sonia) espresso in phon, è indicato accanto a ciascuna curva. Notare che, per un suono a 1.000 Hz, i valori in dB e Phon sono coincidenti.

# Curve isofoniche di Robertson e Dadson (1956)

- Il lavoro di Fletcher e Munson è stato rifatto nel 1956 presso i laboratori inglesi del NPL da Robertson e Dadson.
- Tali curve hanno costituito un notevole passo avanti rispetto alle precedenti, tanto da essere assunte come riferimento dalle norme internazionali ISO 226.
- L'audiogramma di Robertson e Dadson è notevolmente più accurato, ed i risultati ottenuti sono molto diversi da quelli del precedente audiogramma di Fletcher e Munson.
- Se l'orecchio fosse ugualmente sensibile a tutte le frequenze, le curve isofoniche risulterebbero delle linee orizzontali.
- La sensibilità dell'orecchio umano decade sia alle frequenze superiori a 6000 Hz sia a quelle inferiori a 200 Hz, ma in maniera molto più marcata dalla parte dei bassi!

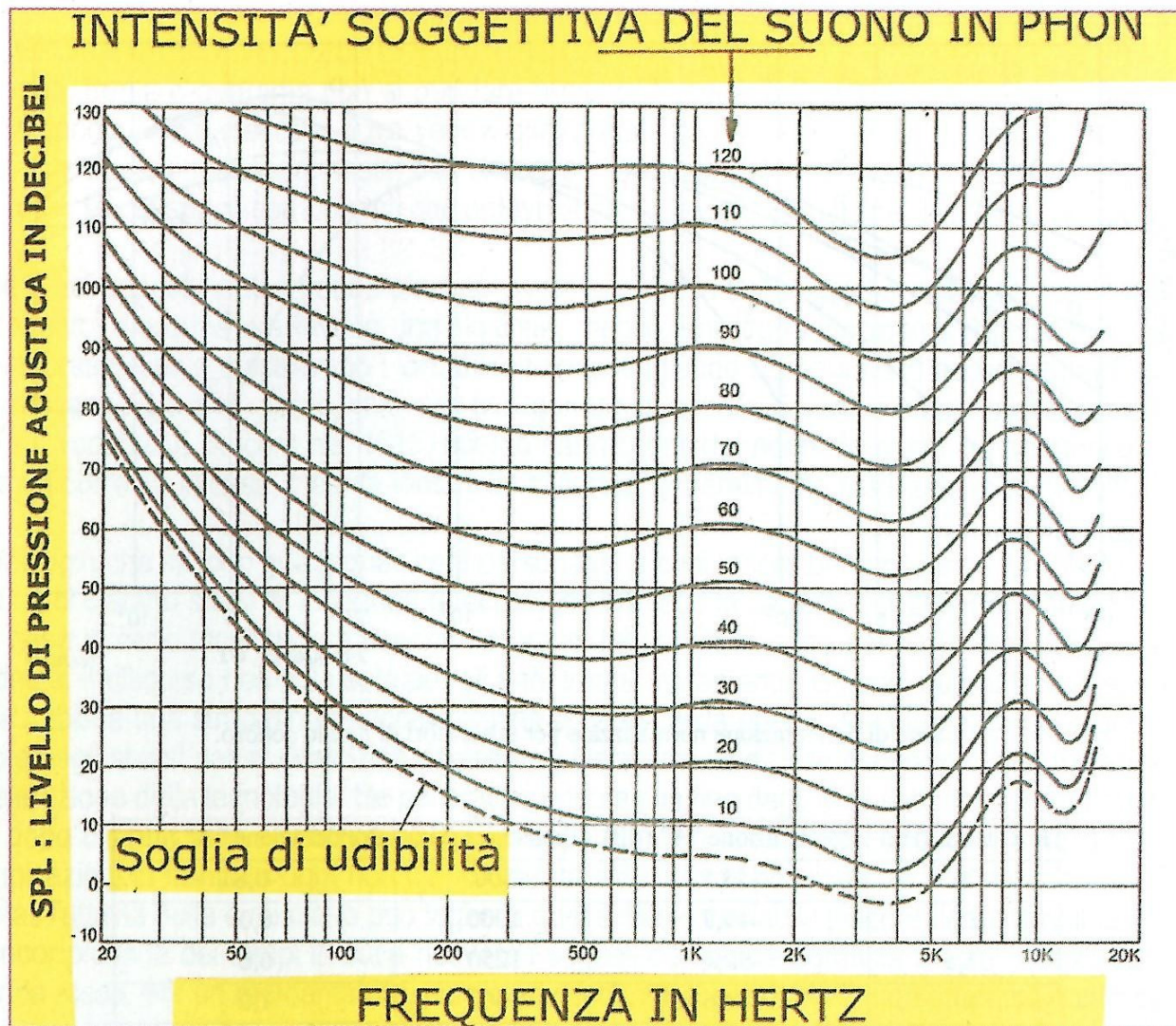


Figura 02 - Le curve isofoniche ricavate al NPL da Robertson e Dadson nel 1956. Si può facilmente osservare che rispetto alle precedenti vi sono differenze abbastanza pesanti. Oggi queste curve fanno parte delle norme internazionali ISO 226.

Curve isofoniche di Robertson e Dadson (figura tratta dalla rivista *Costruire Hi-Fi* n° 119, articolo di Bartolomeo Aloia).

# Esempi applicativi sulle curve di Robertson e Dadson

- ESEMPIO 1: curva del livello sonico di 90 phon.

Nel diagramma di Robertson e Dadson tale curva, seguendola dai 1000 Hz verso sinistra, non risulta sovrapposta alla linea orizzontale dei 90, bensì alla frequenza di 30 Hz sull'asse verticale dell'SPL troviamo circa 110 dB, cioè una perdita di sensibilità di ben 20 dB!

- A livelli minori di intensità sonora soggettiva in phon, la perdita di sensibilità dell'orecchio umano verso le frequenze basse diventa ancora maggiore!

- ESEMPIO 2: curva del livello sonico di 60 phon.

Seguendo tale curva dai 1000 Hz verso sinistra, alla frequenza di 30 Hz sull'asse verticale dell'SPL troviamo circa 90 dB, con una perdita di sensibilità di ben 30 dB!

# Esempio 1: curva dei 90 phon

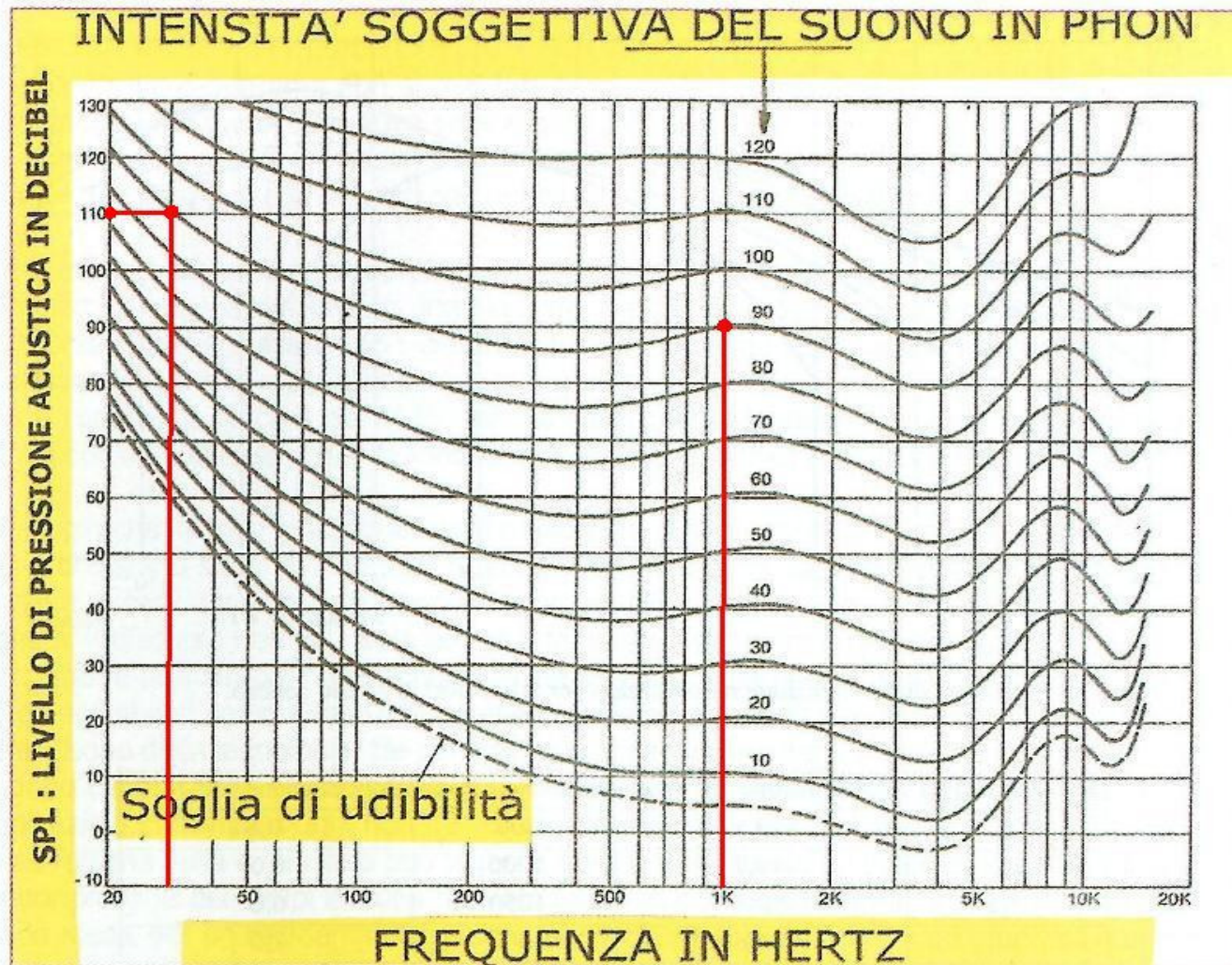


Figura 02 - Le curve isofoniche ricavate al NPL da Robertson e Dadson nel 1956. Si può facilmente osservare che rispetto alle precedenti vi sono differenze abbastanza pesanti. Oggi queste curve fanno parte delle norme internazionali ISO 226.

## Esempio 2: curva dei 60 phon

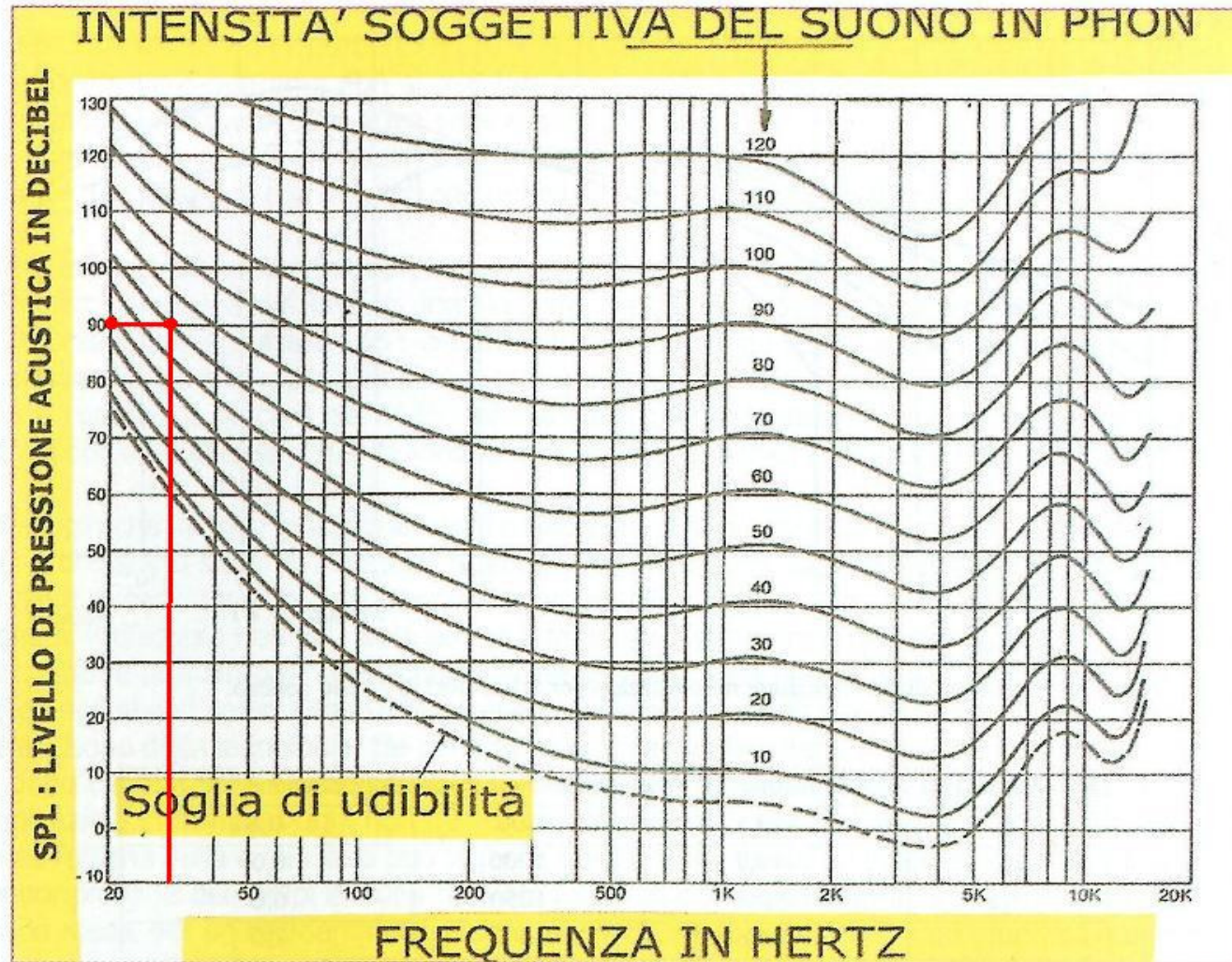


Figura 02 - Le curve isofoniche ricavate al NPL da Robertson e Dadson nel 1956. Si può facilmente osservare che rispetto alle precedenti vi sono differenze abbastanza pesanti. Oggi queste curve fanno parte delle norme internazionali ISO 226.

## Riassumendo sull'intensità sonora percepita

- Convenzionalmente si fissa il livello di sonorità percepita uguale al livello di pressione sonora SPL alla frequenza di 1000 Hz.
- Se la sonorità percepita fosse determinata completamente dalla sola intensità sonora della sorgente, le curve isofoniche sarebbero orizzontali.
- Alle basse e alle alte frequenze si ha un calo di sensibilità dell'orecchio umano. Per percepire un suono di frequenza di 50 Hz alla sonorità di 10 dB occorre, seguendo la curva isofonica relativa e leggendo in ordinata il valore corrispondente a 50 Hz, investire l'orecchio con un SPL di ben 60 dB (cioè circa 100000 volte maggiore!).
- seguendo una retta orizzontale (relativa ad esempio ad un SPL=70 dB) fino ad incontrare la curva isofonica relativa a 40 phon si nota che tale intersezione avviene alle frequenze di 100 e 15000 Hz. A tali frequenze la sonorità percepita è 1000 volte inferiore (da 70 dB a 40 dB) a quella percepita a 1000 Hz (drastico calo di sonorità percepita che si verifica alle basse ed alte frequenze).

- In tali curve si nota la presenza di un minimo (cioè di un massimo di sensibilità) ad una frequenza di poco inferiore ai 4000 Hz; tale frequenza corrisponde alla frequenza di risonanza del condotto uditivo umano.
- Esempio di ascolto di rumore bianco, che contiene tutte le frequenze dello spettro udibile. Esso ha un'intensità crescente al ritmo di 3 dB per ogni secondo, ossia l'intensità (oggettiva) del segnale raddoppia ogni secondo:



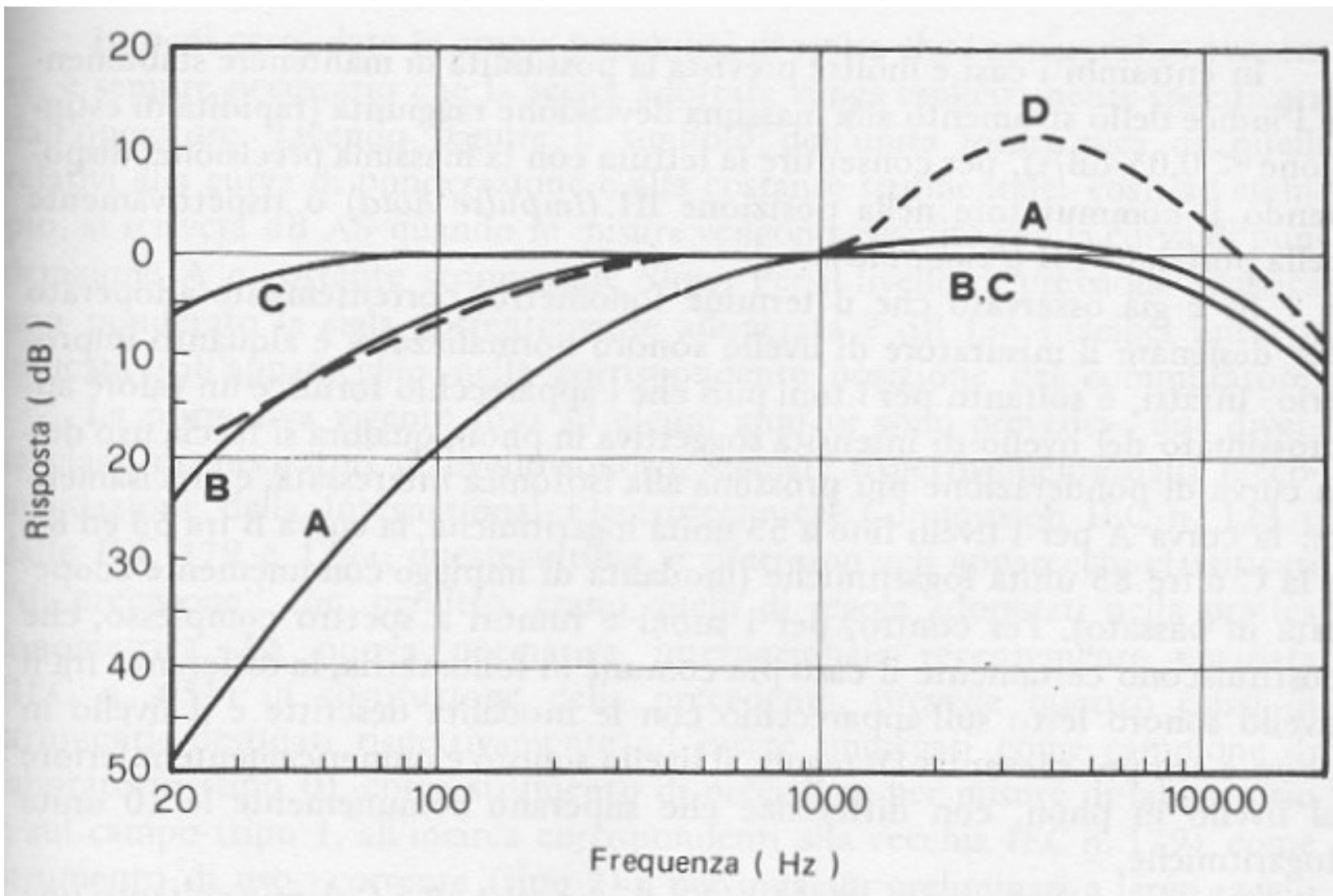
Rumore bianco di intensità crescente di 3 dB/s

# Il fonometro

- Il **fonometro** è un misuratore del livello di pressione acustica.
- Il livello di pressione sonora SPL viene tradotto in un corrispondente segnale elettrico, pesato, quasi sempre, con un particolare filtro di ponderazione, che si riferisce alla corrispondente curva isofonica.
- Viene misurato il valore della fluttuazione della pressione sonora, che viene visualizzato mediante una scala logaritmica (scala dei dB), al fine di emulare la risposta logaritmica agli stimoli sonori tipica del sistema uditivo umano.



- Le curve isofoniche cambiano aspetto al variare dell'intensità della pressione sonora SPL, appiattendosi al crescere dei livelli; pertanto un'unica rete di calibrazione non è sufficiente!
- A bassi livelli di SPL si utilizza la rete di calibrazione A, modellata sulla corrispondente curva isofonica a 40 phon.
- A livelli intermedi di SPL si utilizza la rete di calibrazione B, modellata sulla corrispondente curva isofonica a 70 phon.
- Per suoni molto intensi, si utilizza la rete di calibrazione C, su cui non vengono effettuate correzioni salvo un lieve calo di sensibilità sotto i 50 Hz e sopra i 5000 Hz.
- Le 3 letture vengono dette rispettivamente dB(A), dB(B), dB(C).
- Le calibrazioni B (per livelli sonori intermedi) e D (per rumore aeroportuale), che si utilizzavano in passato, ora sono diventate obsolete, ed i moderni fonometri non le rendono nemmeno più disponibili.



Curve di calibrazione di livello sonoro normalizzato

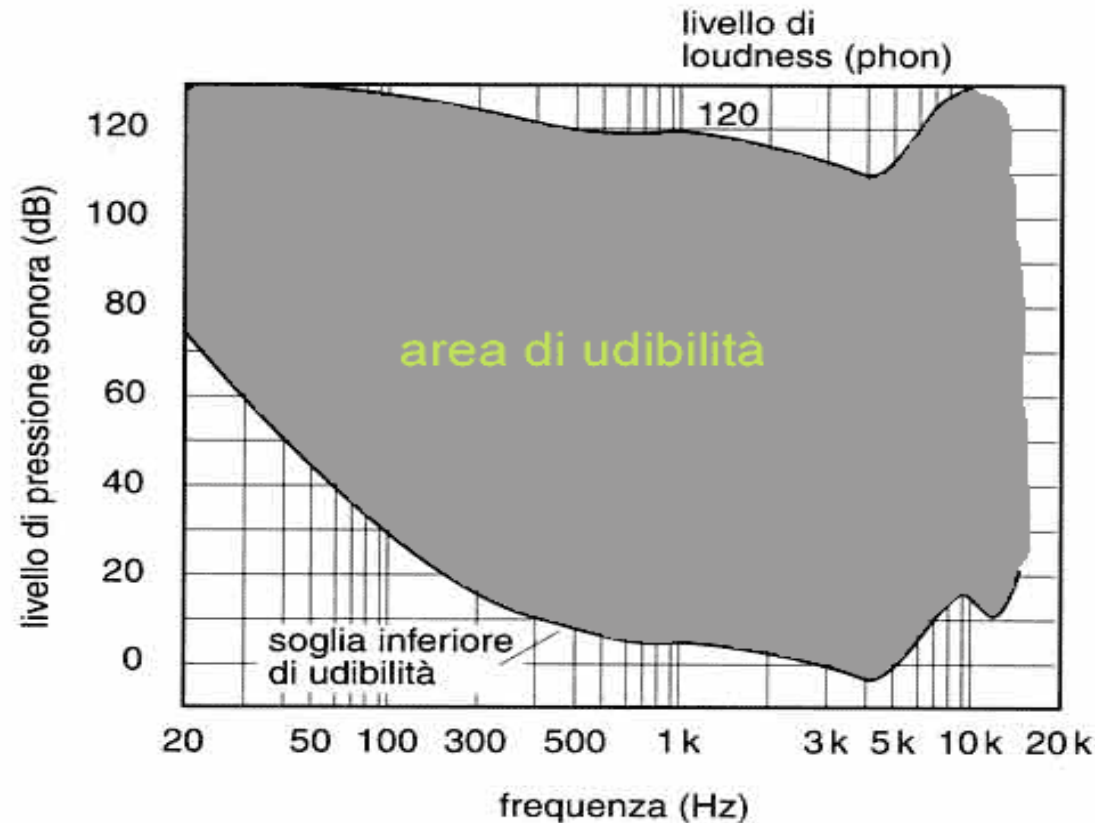
- Il fonometro fornisce il livello della pressione sonora efficace mediato nel tempo con una legge esponenziale (che dà dunque massimo peso agli eventi appena accaduti, e "dimentica" progressivamente gli eventi più vecchi), caratterizzata da una ben definita costante di tempo, e indicata con nomi convenzionali: SLOW (1000 ms), FAST (125 ms), IMPULSE (35 ms in salita, 1.5 s in discesa).
- Si deve porre quindi attenzione alla scelta di tale costante di tempo, soprattutto perché si deve determinare il livello istantaneo massimo di SPL di un evento sonoro.
- Il fonometro è inoltre in grado di misurare e memorizzare il valore istantaneo massimo del segnale di pressione sonora, detto livello di picco massimo (max peak).
- Esperienza di utilizzo di un fonometro per misurare il livello di pressione acustica dell'aula.

## Suoni molto intensi: fatica, adattamento, danni temporanei e irreversibili dell'udito

- Nel caso di suoni molto intensi, l'orecchio umano dispone di una protezione fisiologica: quando il livello di pressione sonora SPL sale oltre gli 85 dB, scatta un effetto protettivo, detto riflesso acustico, che però impiega circa 40 ms per attuarsi, e soltanto dopo 150 ms è completamente operante.
- Il riflesso acustico pertanto è totalmente inadeguato per scoppi improvvisi, come esplosioni o colpi di arma da fuoco!
- L'orecchio umano inoltre sviluppa fenomeni di adattamento alle alte sonorità, nel senso che diventa “assordato” dopo esposizioni prolungate, così da non udire ugualmente bene un altro suono; questo è indice di uno stato di affaticamento.

- Esperimenti effettuati in discoteche hanno dimostrato che l'esposizione per un'ora ad un livello di pressione sonora SPL di 110 dB induce un innalzamento della soglia di udibilità per un suono di frequenza 4000 Hz di oltre 30 dB!
- Tale effetto di innalzamento di soglia di udibilità perdura a lungo, valendo ancora 10 dB dopo 1 ora!

A frequenze più alte e più basse l'affaticamento risulta inferiore, indicando che l'assordamento maggiore si ha attorno ai 4000 Hz.

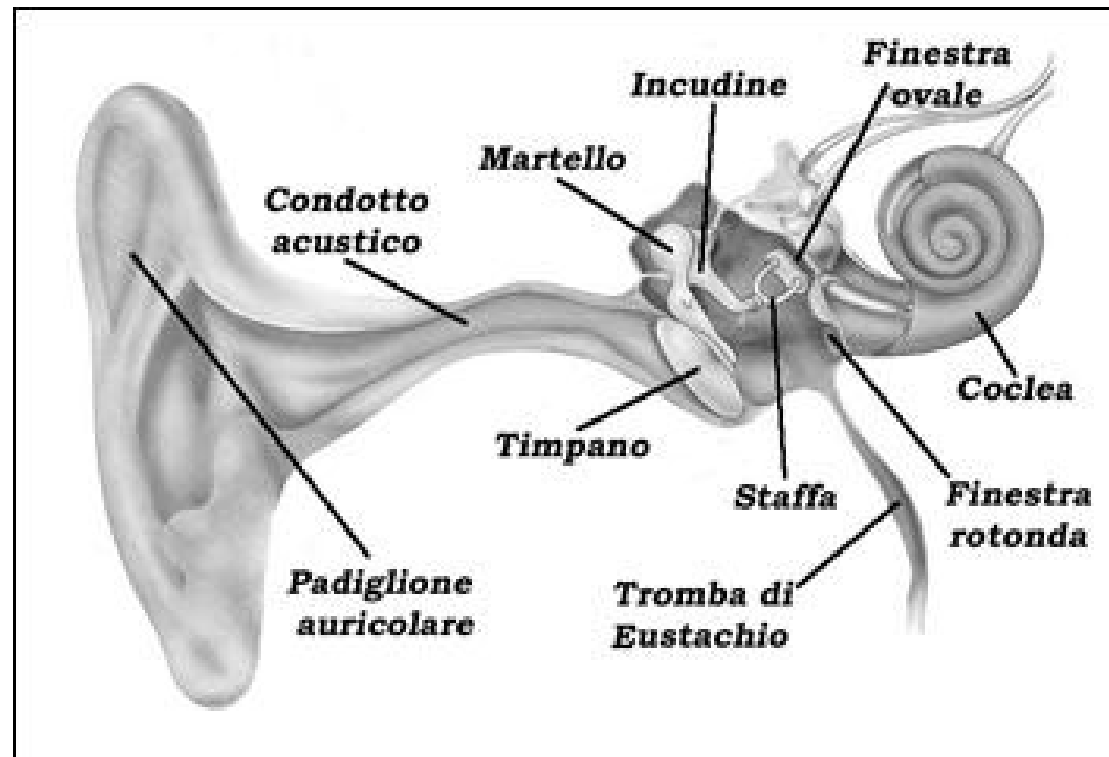


<u>Pressione sonora costante</u> (indicata in deciBel Amplitude pressure level)	<u>Tempo limite di esposizione</u>
<b>80 dB</b> (conversazione media a 1 metro)	<b>16 ore</b>
<b>85 dB</b> (ascolto musicale casalingo medio)	<b>8 ore</b>
<b>90 dB</b> (pub affollato)	<b>4 ore</b>
<b>95 dB</b> (pub affollato con diffusione musicale)	<b>2 ore</b>
<b>100 dB</b> (bar di una discoteca media)	<b>1 ora</b>
<b>105 dB</b> (concerto rock a 10 metri)	<b>30 min.</b>
<b>110 dB</b> (martello pneumatico a 1 metro)	<b>15 min.</b>
<b>115 dB</b> (pista di una discoteca media)	<b>7,5 min.</b>
<b>120 dB</b> (decollo jet a 1 metro: si muore)	<b>0 min.</b>

Tempi limite di esposizione a livelli di pressione sonora SPL costanti

- Superati i limiti di tempo evidenziati nella tabella precedente, l'apparato uditivo umano comincerà a subire danni permanenti e cumulativi.
- Un tipico segnale che ci avverte di aver subito danni permanenti all'udito è costituito da un fastidioso ronzio che permane per ore nelle nostre orecchie dopo essere stati per lungo tempo in ambienti molto rumorosi, come discoteche o pub con musica ad alto volume.
- Tale ronzio è causato dalla perdita funzionale definitiva di una parte delle cellule della coclea, sedi del processo uditivo!
- Basterebbe uscire dal locale ogni mezz'ora, per far riposare le orecchie, oppure ricorrere all'uso di tappi in spugna, per salvaguardare il nostro apparato uditivo.
- L'accumularsi di questi danni ci porterà non solo ad una progressiva perdita dell'udito, ma si rifletterà anche su altre nostre importantissime funzioni vitali, sia fisiologiche (variazioni del ritmo cardiaco, della vista, di coordinazione e tempo di reazione) sia psicologiche (rendendoci, ad esempio, inconsapevolmente più aggressivi verso gli altri...) e, in senso generale, influenzandoci negativamente.

- Esiste anche un altro danneggiamento irreversibile dell'apparato uditivo umano, che si manifesta soprattutto in presenza di suoni improvvisi che colpiscono l'orecchio in maniera troppo rapida perché possa attivarsi la protezione del riflesso acustico.
- Un esempio è dato dal suono percussivo di SPL attorno a 110 dB che si può trovare in discoteca, il cui attacco può avvenire in un tempo di 10 ms, mentre il riflesso acustico di protezione risulta molto più lento.



# Bibliografia

- Frova Andrea, “Fisica nella musica”, Zanichelli editore.
- Farina Angelo, dispense in PowerPoint del corso di “Acustica applicata”, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Parma.
- Aloia Bartolomeo, “Appunti di Elettroacustica”, rivista Costruire Hi-Fi n° 119, Blu Press editore.
- Buccignone Giuseppe, “Corso di principi e modelli della percezione”, Dipartimento di Scienze dell’Informazione, Università di Milano.
- “Fisica, Onde, Musica”, sito prodotto dal Dipartimento di Fisica dell’Università di Modena e Reggio Emilia:  
<http://fisicaondemusica.unimore.it/>
- Wikipedia, enciclopedia libera online: <http://it.wikipedia.org>
- Floyd E. Toole “Sound reproduction”, Focal Press editore.