ACUSTICA PSICOFISICA

Analizzando la risposta dell'orecchio alle diverse frequenze e pressioni, pur essendo questa molto soggettiva, è possibile in linea generale ricavare un grafico detto diagramma di sensazione che mostra quali suoni alle varie frequenze e intensità possono essere percepiti dal sistema uditivo umano. Tale gamma di suoni può essere racchiusa tra due limiti detti soglia dell'udibilità e soglia del dolore: la soglia dell'udibilità rappresenta il limite inferiore di intensità che può essere percepito, la soglia del dolore rappresenta il limite superiore di intensità che non provoca dolore.

Fletcher e Munson, due studiosi che analizzarono la risposta dell'orecchio umano, riuscirono a descrivere questo grafico con l'uso delle curve isofoniche. Essi utilizzando un suono di riferimento a 1000 Hz effettuarono dei test soggettivi variando l'intensità del suono alle varie frequenze per verificare quale produceva un'uguale sensazione sonora. In tal modo ricavarono delle curve isofoniche, rappresentate nel diagramma di Fletcher e Munson (fig. 1), che rappresentavano come variava la sensazione sonora all'interno del campo dell'udibile. La più alta di tali curve corrisponde alla soglia del dolore, la più bassa alla soglia dell'udibilità.

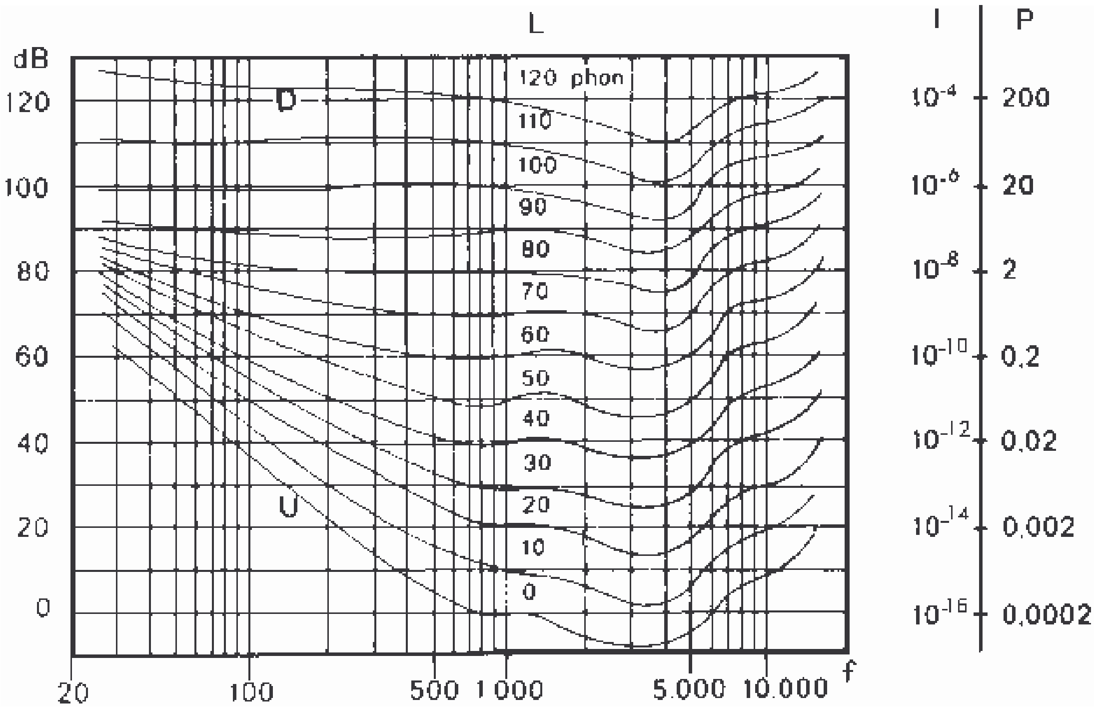

Figura 1. Audiogramma di Fletcher e Munson.

f: frequenza in hertz; L: livello di sensazione sonora; D: soglia del dolore; U: soglia dell'udibilità; I: intensità in watt/cm¹ dell'onda sonora piana; P: pressione in dine/cm¹.

Osservando tali curve è possibile notare che per un'uguale sensazione più bassa (o alta) è la frequenza maggiore (o minore) deve essere l'intensità dello stimolo: si è perciò scoperto che l'udito umano non ha risposta lineare. La sensazione a una frequenza campione di 1000 Hz si raddoppia se l'intensità cresce di un fattore di circa $3{,}16 \cong \sqrt{10}$ per volta. Si è pensato perciò di utilizzare una scala logaritmica invece che lineare per rappresentare tali grafici.

Un esempio può essere:

Pressione in Pa	Livello di Sensazione
0,01	1
0,0316	2
0,1	3
0,316	4
1	5

Per misurare la sensazione sonora si utilizza la scala di Bell (1847-1922 scienziato che inventò la centralina di commutazione, studiò a fondo il fenomeno della sensazione sonora e fondò la AT&T). Nella sua scala il valore del livello della sensazione è dato dalla formula:

$$L = \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \qquad (1)$$

dove ***P*** è la pressione sonora, e $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}\, Pa$ è la pressione sonora soglia a 1000 Hz, cioè la pressione del più piccolo suono udibile a 1000 Hz. L'unità di misura del livello sonoro è il bell (B).

I valori ottenuti con la formula empirica (1) corrispondono bene a quelli trovati sperimentalmente. Poiché però l'unità è troppo grande si preferiscono usare i suoi sottomultipli come 1 B = 10 dB (decibell) e quindi la seguente formula misurata in dB:

$$L = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right)^2 \qquad (2)$$

E' da notare che i valori dei livelli sonori ottenuti con le formule (1) e (2) sono tutti positivi; infatti lo 0 corrisponde al livello minimo udibile.

Come valore di pressione per il calcolo in queste formule non si usano i valori massimi ma i valori medi efficaci (RMS) anche per la facilità di misura degli stessi. Il tempo minimo per la misura di tali valori di pressione deve perciò essere di 125ms.

Poiché la risposta dell'orecchio umano allo stimolo sonoro è logaritmica in ampiezza e varia al variare della frequenza si è deciso di uniformare gli standard di misura approssimando la risposta dell'orecchio umano con un filtro di compensazione che tenga conto delle differenze tra le varie frequenze. A questo proposito sono stati creati i seguenti filtri:

- filtro A: usato per i livelli sonori inferiori ai 60 dB;
- filtro B: usato per i livelli sonori tra i 60 dB e gli 80 dB;
- filtro C: usato per i livelli sonori superiori agli 80 dB;
- filtro D: usato per i livelli sonori superiori ai 100 dB

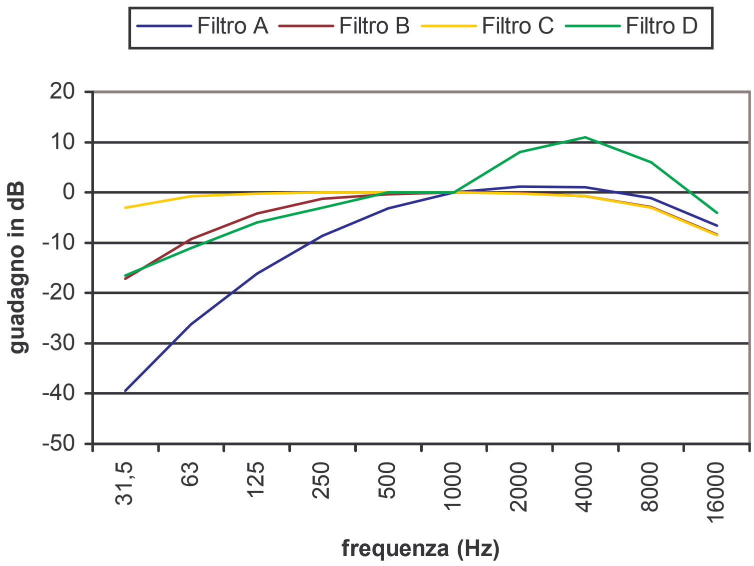

Figura 5. Filtri di ponderazione

Nella pratica i filtri maggiormente utilizzati sono quello A e quello C e le loro risposte sono misurate rispettivamente in dB(A) e in dB(C). Mentre il filtro A è utilizzato a valle del microfono per misurare i valori efficaci medi e stimare la risposta effettiva dell'orecchio, il filtro C è principalmente utilizzato per misurare i massimi di picco di suoni impulsivi, forti e molto brevi, tipo quelli di esplosioni.

Il limite stabilito per legge per l'uomo da un normativa CEE di valore massimo di picco è $L_{P,MAX,PEAK}$ = 130 dB(C), ovvero 130 dB misurati con il filtro C. In Italia invece la vecchia normativa prevede $L_{P,MAX,PEAK}$ = 140 dB(LIN), ovvero 140 dB misurati su scala lineare: tale valore è più tollerante nei confronti delle alte frequenze ed ha l'inconveniente di segnare massimi a causa della non ponderazione dell'intensità di eventi anche non acustici a bassa frequenza.

Somma di livelli sonori

La somma di due o più livelli sonori può essere coerente o incoerente.

La somma si dice **coerente** se entrambi gli stimoli sono identici e in fase. Questo è il caso riportato in figura 2.

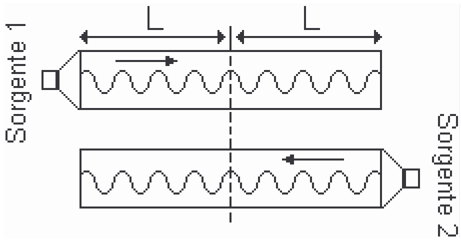

Figura 2. Sorgenti coerenti

In questa situazione, se i due livelli sonori sono L_1=L_2 ed i segnali hanno entrambi la stessa pressione istantanea P_1=P_2 poiché sono lo stesso identico segnale inviato contemporaneamente da due sorgenti equidistanti dal bersaglio, la pressione totale risulta la somma delle pressioni e il livello totale è facilmente ricavabile:

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1 + P_2}{P_0}\right)^2 = 10 \cdot \log 4 + 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2 = 6 + L_1 \qquad (3)$$

Nel caso L_1 = 70 dB allora

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 = 70\text{ dB} + 70\text{ dB} = 6\text{ dB} + 70\text{ dB} = 76\text{ dB}.$$

Questa situazione è estremamente anomala perché è praticamente impossibile trovare due sorgenti di segnale coerenti.

La somma si dice **incoerente** se i due stimoli differiscono per fase e/o intensità. Questo è il caso riportato in figura 3.

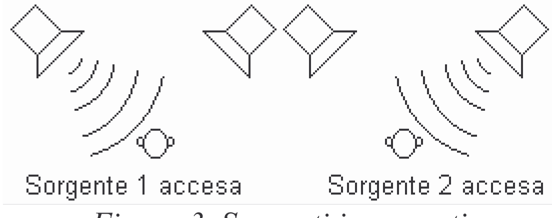

Figura 3. Sorgenti incoerenti

Questo può essere il caso di due casse acustiche collegate ad uno stereo: i due segnali sono diversi perché hanno fase casuale a causa delle riflessioni nell'ambiente. Ci possono allora essere momenti in cui due picchi di pressione si sommano enfatizzandosi e altri in cui un picco ed una valle si sommano eliminandosi. In tal caso per il principio di conservazione dell'energia l'intensità sonora è data dalla somma delle due intensità dei segnali reali, la densità di energia sonora à data dalla somma delle due densità mentre per la pressione non vale tale uguaglianza. La pressione al quadrato risulta proporzionale alla densità di energia e vale la formula:

$$P_{TOT}^2 = P_1^2 + P_2^2 \qquad (4)$$

e quindi il livello sonoro totale diventa:

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} \qquad (5)$$

Come nel caso precedente

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log \frac{P_1^2 + P_2^2}{P_0^2} = 10 \cdot \log 2 + 10 \cdot \log \frac{P_1^2}{P_0^2} = 3 + L_1 \qquad (6)$$

e perciò se $L_1 = L_2 = 70$ dB allora

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 = 70 \text{ dB} + 70 \text{ dB} = 3 \text{ dB} + 70 \text{ dB} = 73 \text{ dB}$$

Dalla formula (5), al variare della differenza tra i due livelli sonori si può ricavare il seguente grafico che stabilisce quale valore va aggiunto al livello sonoro maggiore per la somma di due livelli sonori:

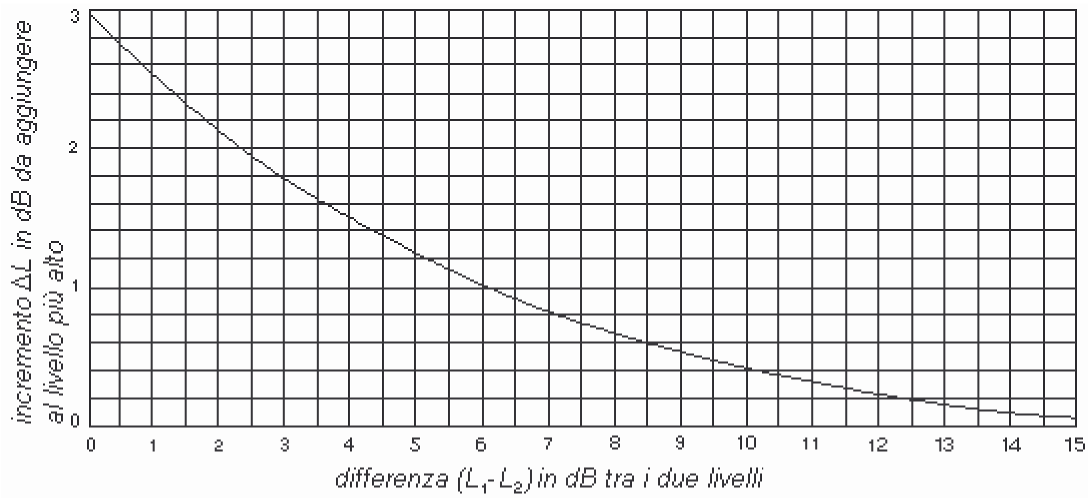

Figura 4. Grafico incrementi per somma incoerente

Questa curva stabilisce che se i due livelli sonori da somma differiscono di più di 15 dB il livello sonoro superiore sovrasta l'altro e ne rende trascurabile il contributo. Il suono con livello inferiore rimane udibile ma un fonometro non sarebbe in grado di stabilire se il suo contributo sia presente nel suono totale.

Se per esempio i due livelli sonori fossero di 70 dB e di 65 dB la loro somma incoerente sarebbe:

$$L_1 - L_2 = 5\text{dB} \Rightarrow \Delta L = 1{,}2\text{dB} \Rightarrow L_{TOT} = L_1 + L_2 = L_1 + \Delta L = 70 + 1{,}2 = 71{,}2\text{dB}$$

Se invece si hanno più di due livelli sonori di cui viene fornito lo spettro si può calcolarne il livello totale. Infatti dalla formula (2) si può ricavare:

$$P^2 = P_0^{\,2} \cdot 10^{\frac{L}{10}} \qquad (7)$$

che sostituito nella (5) da:

$$L_{TOT} = 10 \cdot \log \frac{\sum_i P_i^2}{P_0^{\,2}} = 10 \cdot \log \frac{\sum_i P_0^{\,2} \cdot 10^{\frac{L_i}{10}}}{P_0^{\,2}} = 10 \cdot \log\left(\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}}\right) \qquad (8)$$

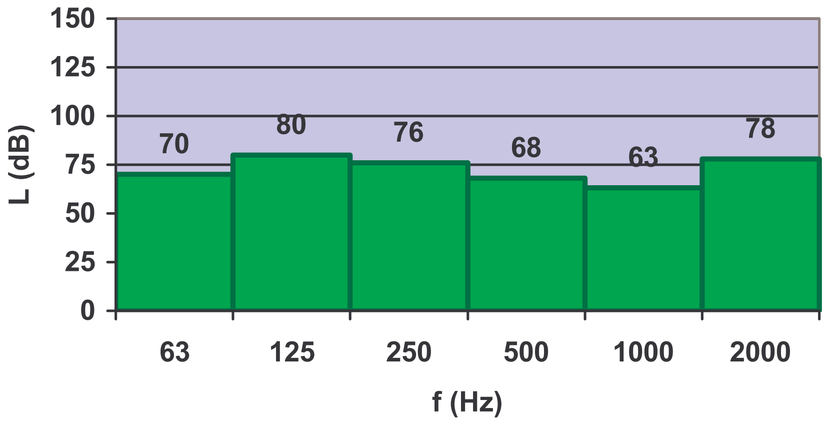

Figura 5. Spettro in bande d'ottava dei livelli sonori di un segnale

Con i dati dello spettro in figura 12 si ricava:

$$L_{TOT,LIN} = 10 \cdot \log\left(10^7 + 10^8 + 10^{7,6} + 10^{6,8} + 10^{6,3} + 10^{7,8}\right) = 83{,}45\,\mathrm{dB(LIN)}$$

Questo però è il valore calcolato con la scala lineare. Nel caso si desideri il valore preciso nella scala A bisogna modificare banda d'ottava per banda d'ottava i valori dei livelli con quelli del filtro A.

Frequenza di centrobanda f (Hz)	Livello sonoro lineare L (dB)	Correzione di tipo A A_W (dB)	Livello sonoro ponderato L_W (dB(A))
63	70	-26,2	43,8
125	80	-16,1	63,9
250	76	-8,6	67,4
500	68	-3,2	64,8
1000	63	0	63
2000	78	+1,2	79,2

In questo modo, applicando la ponderazione alle bande d'ottava, si ottengono i livelli sonori ponderati in dB(A). Il livello sonoro totale equivalente ponderato con il filtro A è allora:

$$L_{TOT,A} = 10 \cdot \log\left(10^{4,38} + 10^{6,39} + 10^{6,74} + 10^{6,48} + 10^{6,3} + 10^{7,92}\right) = 79{,}8\,\mathrm{dB(A)}$$