

1 Le basi dell'acustica e della percezione uditiva

1.1 Acustica e propagazione delle onde sonore

L'acustica si occupa di vibrazioni meccaniche in un mezzo solido, liquido o gassoso che sono udibili per l'uomo.

Le onde sonore sono vibrazioni meccaniche di particelle in un mezzo gassoso, liquido o solido. Nel vuoto le onde sonore non si possono propagare. Le onde sonore (e di conseguenza anche le loro informazioni ed energia) si propagano senza che la loro posizione media, nel gas o nel solido dove si propagano, cambi. Ogni singola particella oscilla attorno alla sua posizione di riposo e trasmette le informazioni alla particella accanto (**Figura 1.1**).

La velocità del suono dipende del mezzo di propagazione. Nell'aria, la velocità del suono è di circa 340 m/s, ovvero le onde sonore fanno circa un chilometro nell'arco di tre secondi. La velocità del suono dipende anche dalla temperatura. Nell'aria calda, le molecole di gas si muovono più velocemente, di conseguenza le onde sonore si propagano più velocemente. Nell'acqua, le onde sonore si propagano circa cinque volte più velocemente (1500 m/s) che nell'aria.

(NB: La velocità della luce è circa 1.000.000 volte superiore a quella del suono. Luce e altre onde elettromagnetiche possono propagarsi anche nel vuoto).

Le onde sonore producono variazioni di pressione nel mezzo di propagazione. In audiologia queste variazioni di pressione sono spesso ricorrenti (periodiche). Per descrivere questi tipi di segnali acustici sono in uso di-

Definizione

Onde sonore

Velocità del suono

Descrizione fisica

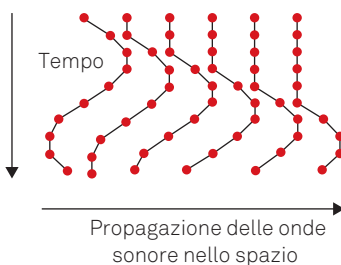


Figura 1.1.

Propagazione delle onde sonore: le particelle (punti rossi) oscillano attorno alla loro posizione di riposo e rimangono nella loro posizione media mentre l'onda sonora si propaga.

2 1. Le basi dell'acustica e della percezione uditiva

Hertz, Hz e kHz

Ampiezza e intensità acustica

Onda sonora per via aerea e onda sonora per via strutturale

versi termini e grandezze. I più importanti sono rappresentati in **Figura 1.2** e in **Tabella 1.I**.

L'unità di misura della frequenza è l'Hertz, abbreviato Hz. 1 Hz corrisponde a un ciclo al secondo. Quando si parla di frequenze molto alte vale la pena usare kilo-Hertz (kHz) anziché Hz. 1 kHz corrisponde a 1000 Hz.

Al posto della pressione sonora in Pascal (Pa), in alcuni casi si parla di intensità acustica. L'intensità acustica è la potenza sonora (potenza = energia per unità di tempo) che passa attraverso una data superficie. L'intensità acustica è proporzionale al quadrato della pressione sonora. L'unità di misura è W/m^2 (Watt per metro quadrato).

L'onda sonora che si propaga attraverso l'aria viene detta onda sonora aerea. L'onda sonora che si propaga attraverso un corpo solido (per esempio, attraverso il cranio quando un diapason viene fatto vibrare sopra la fronte, oppure attraverso le travi di ferro in un edificio) viene detta onda sonora per via strutturale. La propagazione di onde sonore attraverso l'aria può venir ridotta da ostacoli meccanici (porte chiuse, locali con pareti doppie, ecc.). La propagazione di onde sonore attraverso corpi solidi può essere ridotta in modo efficace solamente interrompendo il percorso acustico.

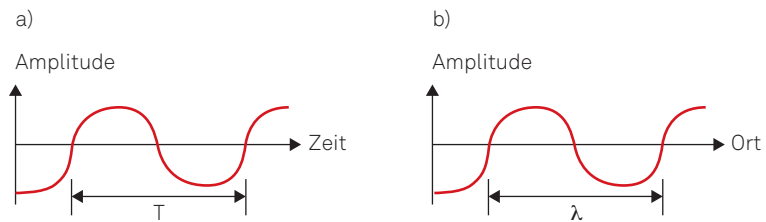


Figura 1.2. Rappresentazione dell'andamento dell'ampiezza di un segnale periodico in funzione: A) del tempo; e B) della posizione.

Tabella 1.I. Simboli e unità di misura in uso per descrivere i segnali acustici periodici.

Grandezza	Simboli	Unità di misura
Tempo	t	Secondi (s)
Periodo	T	Secondi (s)
Frequenza	$f = 1/T$	Hertz (Hz)
Lunghezza d'onda	λ	Metri (m)
Numero d'onda	$k = 1/\lambda$	1/metro (m^{-1})
Ampiezza d'onda (spesso pressione sonora; pressione = forza pro-superficie)	A o p	Pascal (Pa) = N/m^2

1.2 Percezione sensoriale

L'uomo può percepire il mondo circostante attraverso diversi tipi di stimoli. Per esempio, attraverso l'udito, la vista o l'olfatto.

All'interno di ogni modalità sensoriale possono essere percepite diverse qualità sensoriali. Per l'udito si tratta dell'altezza del suono, mentre per la vista si tratta della luminosità e dei tre colori rosso, blu e verde.

Lo stimolo adeguato è quello stimolo fisico a cui un organo di senso reagisce con la soglia più bassa. Lo stimolo adeguato per l'occhio è la luce, per l'orecchio è il suono. Se un organo di senso viene stimolato in modo sufficientemente forte da uno stimolo diverso da quello adeguato (per esempio un colpo all'occhio = stimolo meccanico forte), quest'ultimo verrà interpretato soggettivamente in modo analogo allo stimolo adeguato: si vedono eventualmente "le stelle".

In generale, più lo stimolo fisico S è forte, più l'intensità dello stimolo percepito P è forte. Per molti organi sensoriali questa relazione non è lineare bensì all'incirca logaritmica.

$$P = C \cdot \log S \quad (C = \text{Costante})$$

Questa relazione è conosciuta come la legge di Weber-Fechner. I suoi effetti sull'udito umano sono tema del prossimo capitolo.

1.3 Percezione uditiva e massa logaritmica

Segnali acustici ad ampiezza elevata vengono percepiti come suoni forti, quelli ad ampiezza minore come suoni deboli. Segnali acustici a bassa frequenza vengono percepiti come suoni bassi, quelli ad alta frequenza come suoni alti.

L'ampiezza oggettivamente misurabile corrisponde al livello sonoro soggettivo. La frequenza oggettivamente misurabile corrisponde all'altezza del suono soggettiva.

Secondo la legge di Weber-Fechner, le proprietà fisiche del suono sono in relazione all'incirca logaritmica sia con il livello sonoro come pure con l'altezza del suono. Gli esempi del materiale supplementare in linea illustrano questo fenomeno.

Giovani con udito normale percepiscono segnali acustici la cui frequenza è compresa tra i 16 e i 20.000 Hz. Con l'età diminuisce la sensibilità soprattutto per le frequenze più alte.

Il raddoppio della frequenza corrisponde a un'ottava. Secondo la legge di Weber-Fechner, una determinata differenza di frequenza (per esem-

Modalità sensoriali

Qualità sensoriali

Stimolo adeguato

Relazione tra l'intensità dello stimolo fisico e dello stimolo percepito

Proprietà fisiche del suono e percezione uditiva

Percezione logaritmica

Gamma udibile

Ottava

4 1. Le basi dell'acustica e della percezione uditiva

pio, 1000 Hz) non viene percepita nella stessa misura in altezza del suono, bensì con lo stesso rapporto (per esempio, il raddoppio della frequenza).

Altri intervalli musicali

Anche altri intervalli musicali sono ordinati in modo logaritmico. Per esempio, l'intervallo di un tono (indipendentemente dalla frequenza assoluta) corrisponde a una variazione della frequenza del fattore 1,12, l'intervallo di una terza maggiore a una variazione della frequenza del fattore 1,26.

(NB: La scala musicale non è esattamente logaritmica – per le frequenze molto alte e molto basse, per esempio per le ottave maggiori e inferiori di un pianoforte, bisogna scegliere differenze di frequenza leggermente maggiori rispetto a quello che si calcolerebbe. Inoltre, ci sono riferimenti secondo cui la musica si basa su scale di tono logaritmiche in quasi tutte le culture ma non in tutte. La musica degli indiani Nazca del Perù si basa probabilmente su una scala di tono lineare, cosa che alle nostre orecchie suona molto strano. Le tracce 3 e 4 del materiale supplementare in linea contengono esempi di scale musicali diverse.

Capacità di differenziare le frequenze

Nelle migliori condizioni, una persona con udito normale può distinguere nelle frequenze medie fino a una differenza di frequenza dello 0,2%, ovvero per esempio la differenza tra 1000 Hz e 1002 Hz.

Percezione delle diverse componenti della frequenza

Un segnale acustico può essere costituito da diverse componenti che variano per la loro frequenza. Il nostro udito è in grado di analizzare con precisione questi segnali acustici complessi grazie alle diverse componenti delle rispettive frequenze (in confronto, la capacità di analizzare le frequenze dei diversi colori componenti la luce per mezzo del nostro occhio è molto più ridotta).

Tono, timbro, rumore

In base all'analisi delle frequenze si distinguono tre categorie di segnali acustici: il tono, il timbro e il rumore.

Tono

Il tono, anche "suono puro", è caratterizzato da una sola frequenza. In relazione al tempo (ovvero nel grafico dell'ampiezza in funzione del tempo; si veda **Figura 1.3A**) il tono rappresenta una sinusoida, in relazione alla frequenza (ovvero nel grafico dell'ampiezza in funzione della frequenza; si veda **Figura 1.3B**) il tono ha una sola componente. Molte persone percepiscono i suoni puri come taglienti e sgradevoli. La traccia 5 del materiale supplementare in linea contiene esempi di suoni puri di diverse frequenze.

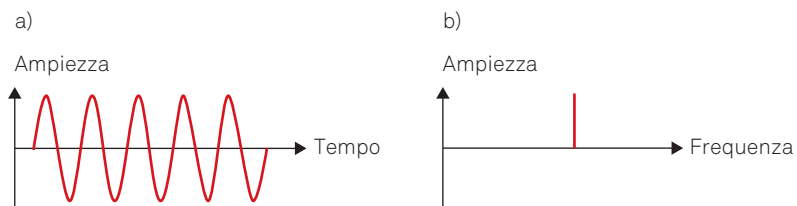


Figura 1.3. Tono in funzione: A) del tempo; e B) della frequenza.

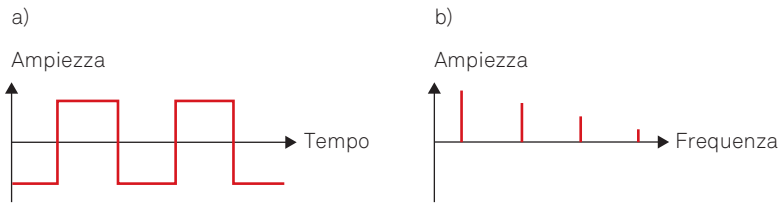


Figura 1.4. Esempio di un timbro in funzione: A) del tempo; e B) della frequenza.

Un timbro è composto da diverse componenti la cui frequenza corrisponde a multipli interi della frequenza più bassa, la cosiddetta frequenza fondamentale. La componente che corrisponde al doppio della frequenza fondamentale è detta seconda armonica, quella che rappresenta il triplo della frequenza fondamentale terza armonica, eccetera. I diversi timbri si distinguono per l'ampiezza relativa delle loro singole componenti. Alcune componenti possono anche mancare (per esempio, al timbro della **Figura 1.4A** mancano tutte le armoniche pari). Allo stesso modo, le curve in funzione del tempo possono essere molto differenti l'una dell'altra, rimangono però sempre periodiche. Quasi tutti gli strumenti musicali producono timbri. A dipendenza della distribuzione delle armoniche si possono riconoscere i diversi strumenti. Le tracce 6, 7 e 8 del materiale supplementare in linea contengono diversi timbri e il confronto con i toni.

In funzione del tempo, i rumori sono caratterizzati da ampiezze irregolari e non ripetitive. La **Figura 1.5** ne illustra un esempio. I rumori possono essere limitati (per esempio, una porta che si chiude, applausi) o illimitati (per esempio, il rumore dell'acqua) nel tempo. Lo spettro delle frequenze in entrambi i casi è continuo, ovvero non limitato a singole linee di frequenza come nel caso dei toni e dei timbri.

Il livello di pressione sonora viene normalmente misurato in decibel (dB). In realtà non si tratta di un'unità di misura, bensì di un rapporto.

Il dB è una misura relativa. Come nel caso delle percentuali, deve essere conosciuto per lo meno il valore di riferimento a cui ci si riferisce.

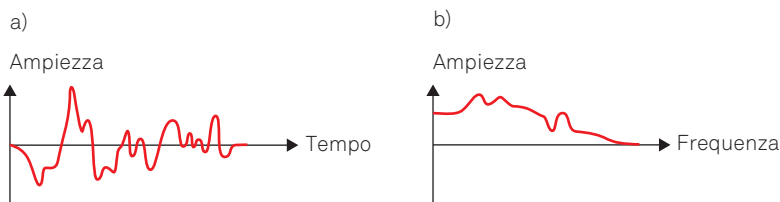


Figura 1.5. Esempio di un rumore in funzione: A) del tempo; e B) della frequenza.

Timbro

Rumore

Decibel (dB)

dB: le sue proprietà

Il dB è inoltre una misura logaritmica. Una certa variazione di livello (per esempio, di 20 dB) non indica la stessa variazione assoluta dell'ampiezza, bensì lo stesso rapporto. Per esempio, variando di 20 dB il livello abbiamo una variazione dell'ampiezza del fattore 10.

Esempio 1: Ampiezza 0,001 Pa aumentata di 20 dB = 0,01 Pa

Esempio 2: Ampiezza 1 Pa aumentata di 20 dB = 10 Pa

Definizione e calcolo

Esistono due formule equivalenti per il calcolo del livello in dB: una è conosciuta come l'ampiezza A del segnale, l'altra è conosciuta come la potenza P o l'intensità del segnale.

$$L = 20 \cdot \log_{10} (A/A_0) \text{ o}$$

$$L = 10 \cdot \log_{10} (P/P_0)$$

L = Livello in dB.

\log_{10} = Logaritmo in base 10.

A = Ampiezza del segnale esaminato.

A_0 = Ampiezza del segnale di riferimento.

P = Potenza o intensità del segnale esaminato.

P_0 = Potenza o intensità del segnale di riferimento.

Livello in dB, ampiezza e potenza sonora

Applicando queste formule a vari rapporti tra segnale esaminato e segnale di riferimento si ottengono i risultati riportati in **Tabella 1.II**.

I rapporti di ampiezza e potenza aumentano velocemente più grande è la differenza di livello. Una differenza di livello di 0 dB non significa che non vi è alcun segnale, bensì indica che l'ampiezza del segnale esaminato è uguale a quella del segnale di riferimento. Valori negativi in dB indicano che il livello del segnale esaminato è inferiore a quello del segnale di riferimento.

Soglia della differenza dell'intensità

La più piccola differenza di intensità ancora percepibile viene detta soglia della differenza dell'intensità. Questa dipende dal livello assoluto del

Tabella 1.II. Rapporti di ampiezza e potenza di due segnali per alcune differenze di livello.

Differenza di livello (dB)	Rapporto di ampiezza	Rapporto di potenza o intensità
-40 dB	0,01	0,0001
-20 dB	0,1	0,01
0 dB	1	1
20 dB	10	100
40 dB	100	10 000
60 dB	1000	1 000 000
80 dB	10 000	100 000 000
100 dB	100 000	10 000 000 000
120 dB	1 000 000	1 000 000 000 000

segnale (confronta Tabella 8.I). Per l'orecchio umano si tratta di circa 1dB (si vedano esempi alle tracce 9-11 del materiale supplementare in linea).

Con il dB si descrive l'ampiezza o l'intensità obbiettiva di un segnale. Il volume descrive invece la sensazione soggettiva del segnale acustico. Come la sensazione dell'altezza del suono, anche la sensazione del volume è all'incirca logaritmica, il che non sorprende se si pensa alla legge di Weber-Fechner. Le tracce 9-12 del materiale supplementare in linea contengono esempi di graduazioni lineari e logaritmiche dell'ampiezza sonora. Solo la graduazione logaritmica viene percepita in modo proporzionale. Nella gradazione lineare, invece, i cambiamenti di ampiezza o intensità appaiono soggettivamente troppo piccoli nei livelli più alti, e troppo grandi nei livelli più bassi.

Livello e volume

Un aumento del livello del segnale di 10 dB significa:

- un aumento della potenza sonora o dell'intensità del suono di un fattore 10;
- un aumento dell'ampiezza di circa un fattore 3;
- un aumento del volume percepito di solamente un fattore 2 circa.

Significato di 10 dB

Un grande vantaggio della scala dB è che le moltiplicazioni dei valori di trasferimento da un'unità alla seguente (per esempio, microfono – amplificatore 1 – amplificatore 2 – altoparlante) possono essere sostituite da addizioni. Così sono stati semplificati i calcoli, soprattutto nell'epoca in cui le calcolatrici non erano alla portata di tutti. Un esempio per un sistema a tre livelli (entrambe le colonne di numeri corrispondono e sono equivalenti l'una con l'altra):

Calcolare coi logaritmi

1. Livello (Amplificatore):	× 100	+40 dB
2. Livello (Amplificatore):	× 2,5	+8 dB
3. Livello (Amplificatore):	× 0,1 (= :10)	-20 dB
Amplificazione totale	× 25	+28 dB

In audiologia vengono utilizzati soprattutto tre diversi valori di riferimento.

1. *La pressione sonora assoluta* $P_o = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 20 \mu\text{Pa}$.

I valori in dB con questi valori fisici di riferimento vengono contrassegnati ulteriormente con SPL (*sound pressure level*; per esempio, 65 dB SPL).

Valori di riferimento per livelli in dB

2. *La soglia uditiva di giovani normoudenti*

I valori in dB con questi valori fisici di riferimento vengono talvolta contrassegnati con HL (*hearing level*). Dato che si tratta del riferimento più usato in audiologia, questa precisazione viene spesso tralasciata.

3. *La soglia uditiva del soggetto esaminato*

I valori che si riferiscono alla soglia uditiva del singolo soggetto esaminato vengono contrassegnati con l'aggiunta SL (*sensation level*).

I valori del livello in dB HL sono definiti solo per stimoli tonali. Per gli stimoli non tonali, come per esempio per rilevazione dei potenziali acustici evocati, si usano valori in dB nHL (*normal hearing level* o *normalized hearing level*). Anche questi ultimi si riferiscono alla soglia uditiva di adulti normoudenti, come in valori dB HL.

Fattori di correzione SPL/HL

Dato che l'orecchio umano è più sensibile per le frequenze medie, ovvero tra i 1000 e i 4000 Hz, e che la sensibilità per le frequenze più alte e più basse diminuisce, risulta una differenza tra i livelli in dB SPL e dB HL che varia a dipendenza della frequenza (**Tabella 1.III**).

Esempio 1

Un orecchio con una lieve perdita dell'udito ha soglia d'udibilità a 2000 Hz 35 dB superiore a quella di un normoudente. Con un audiometro viene trasmesso un tono di 55 dB a 2000 Hz. Senza ulteriori precisazioni in audiologia si intendono 55 dB HL. Dato l'aumento della soglia d'udibilità di 35 dB, il livello sonoro di questo orecchio può essere indicato anche con $55 \text{ dB} - 35 \text{ dB} = 20 \text{ dB SL}$.

Esempio 2

Una persona si trova in una camera anecoica davanti a un amplificatore da cui provengono in modo alternato segnali a banda stretta con una frequenza media di 250 Hz e 4000 Hz. Il livello sonoro di entrambi i segnali è di 60 dB. Nonostante ciò, questi due segnali non vengono percepiti altrettanto forti. Il livello sonoro a 250 Hz corrisponde a $60 \text{ dB} - 11,0 \text{ dB} = 49 \text{ dB HL}$, a 4000 Hz invece a $60 \text{ dB} + 6,5 \text{ dB} = 66,5 \text{ dB}$ (fattori di correzione alla **Tabella 1.III**.)

Volume e Phon

Talvolta le informazioni del volume vengono indicate con l'unità Phon. Per definizione, il volume di un tono sinusoidale di 1000 Hz in Phon corrisponde esattamente alla sua pressione sonora in dB SPL. Per tutte le altre frequenze, il volume in Phon corrisponde al livello di un tono che un normoudente percepisce come altrettanto forte a 1000 Hz in dB SPL. Dato che il nostro udito è più sensibile alle frequenze tra i 1000 e i 4000 Hz, per tutte le altre frequenze sono necessari livelli in dB SPL superiori per raggiungere lo stesso volume in Phon che a 1000 Hz.

Tabella 1.III. Differenza tra i valori in dB HL e dB SPL (campo libero; fonte del suono davanti, secondo ISO 389-7).

Frequenza	Differenza dB SPL – dB HL
125 Hz	-22,0 dB
250 Hz	-11,0 dB
500 Hz	-4,0 dB
1000 Hz	-2,0 dB
2000 Hz	+ 1,5 dB
4000 Hz	+ 6,5 dB
8000 Hz	-11,5 dB