

ONDE SONORE

Le onde sonore sono onde elastiche longitudinali che si propagano in un mezzo deformabile come l'aria; nei liquidi o nei solidi possono essere sia longitudinali che trasversali.

Le onde del mezzo entrano in oscillazione e questa vibrazione si propaga nello spazio e nel tempo.

La velocità di propagazione del suono è: in aria ~ 340 m/s

in acqua ~ 1500 m/s

nei solidi > 2000 m/s

Queste differenze di velocità danno origine ad effetti significativi in corrispondenza delle superfici di separazione tramezzi diversi (echi etc.)

L'intero spettro acustico viene suddiviso in tre regioni:

infrasuoni Frequenze < 20 Hz

suoni udibili Frequenze fra 20 Hz e 20000 Hz

ultrasuoni Frequenze > 20000 Hz

Ricordando che in aria $v = 340$ m/s, avremo per le frequenze acustiche udibili un intervallo di lunghezze d'onda compreso fra 1,72 cm e 17,2 m

Tabella 1.1 Intervalli di frequenza in Hz.

cane	gatto	delfino	pipistrello	rana
15-50 000	60-65 000	150-150 000	1000-120 000	50-10 000

SUONO e RUMORE

Esiste una sostanziale differenza fra suono e rumore.

Il rumore è una vibrazione del tutto irregolare alla quale manca un preciso carattere di periodicità (non analizzabile in termini di Fourier).

Il suono se puro è una semplice vibrazione armonica (un semplice senoide), se complesso è costituito dalla sovrapposizione di onde semplici. Il suono complesso è scomponibile nella somma di una serie di componenti sinusoidali semplici in relazione armonica fra loro; la componente a frequenza più bassa viene chiamata prima armonica o fondamentale, mentre le armoniche superiori hanno frequenze multiple di quella fondamentale.

L'altezza di un suono (la nota) nei suoni complessi dipende dalla frequenza della vibrazione fondamentale.

Il timbro di un suono dipende dalla forma della vibrazione complessa, cioè dal numero e dalle ampiezze della varie armoniche presenti.

L'intensità di un suono dipende dall'energia trasportata dall'onda sonora, cioè dal quadrato delle ampiezze massime delle vibrazioni semplici che lo compongono.

L'ampiezza è massima in prossimità della sorgente.

Alcuni esempi di analisi di Fourier di suoni complessi

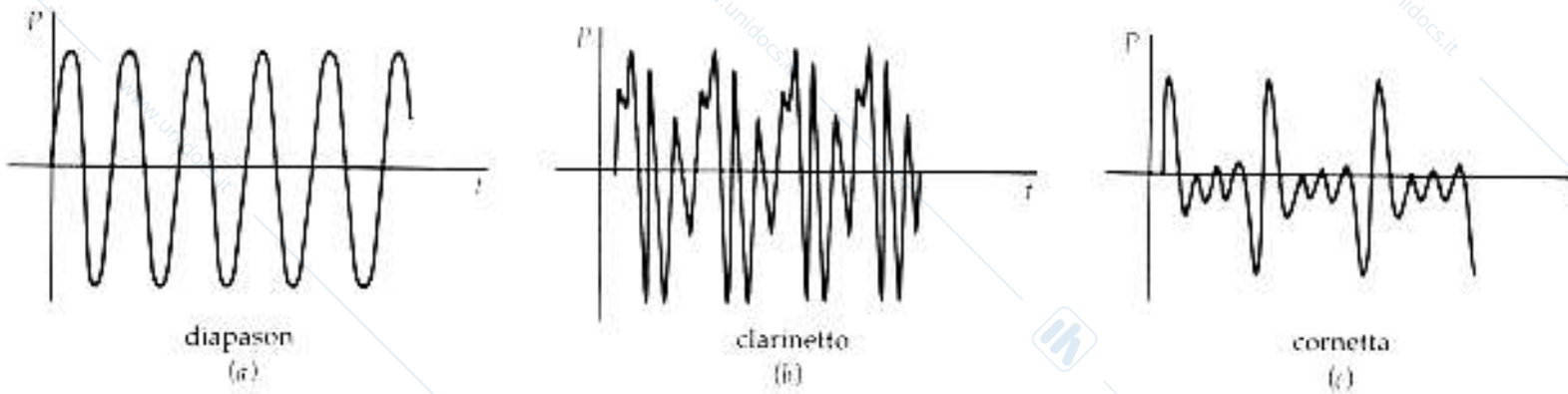


Figura 17.22. Forma d'onda (a) di un diapason, (b) di un clarinetto e (c) di una cornetta, tutte alla frequenza di 440 Hz e con un'intensità circa uguale.

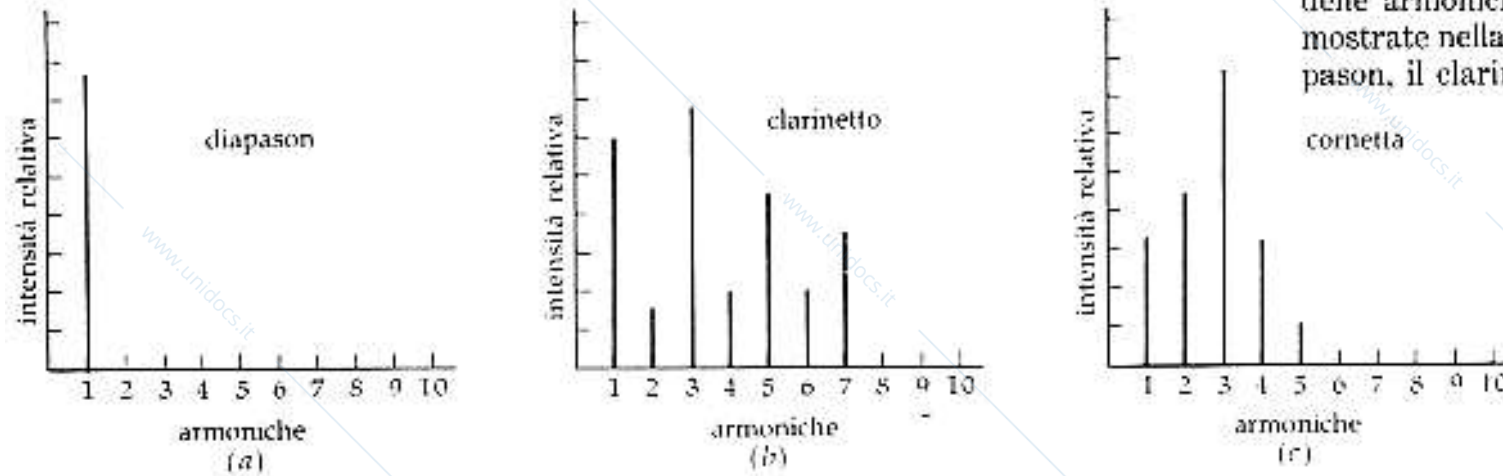


Figura 17.23. Le intensità relative delle armoniche nelle forme d'onda mostrate nella figura 17.22 per il diapason, il clarinetto e la cornetta.

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

La propagazione di un suono determina un variazione della pressione istantanea secondo una legge di tipo sinusoidale:

$$\Delta p = \Delta p_0 \sin(\omega t + \phi)$$

dove Δp_0 è la ampiezza massima della pressione sonora istantanea.

La velocità di propagazione del suono è data da:

Dove P.M. è il peso molecolare del gas

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{P.M.}}$$

Essa non dipende da pressione e densità; si dimostra che la velocità del suono è dello stesso ordine di grandezza della velocità media delle molecole del gas.

L'intensità sonora I è la quantità di energia che attraversa nell'unità di tempo l'unità di superficie e si misura in watt/m^2 . La relazione tra intensità sonora e ampiezza massima di pressione sonora è: dove v è la velocità e d è la densità del mezzo.

$$I = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_0^2}{vd}$$

Il suono emesso da una sorgente puntiforme si propaga per onde sferiche in tutte le direzioni; su tali superfici sferiche l'energia sarà uniforme. Per il principio di conservazione dell'energia ricaviamo la relazione fra intensità sonora e la distanza:

$$I = \frac{E}{4\pi r^2 \Delta t}$$

L'ORECCHIO UMANO

L'orecchio umano è un organo complesso che trasforma le onde sonore, che arrivano nel meato uditivo, in vibrazioni meccaniche a mezzo della catena degli ossicini e che successivamente trasduce tali sollecitazioni in segnali bioelettrici a mezzo delle cellule cocleari. Questi segnali bioelettrici, attraverso il nervo acustico, raggiungono le aree associative della corteccia cerebrale, dove vengono analizzati ed interpretati.

La sensibilità dell'orecchio umano va dalla soglia di udibilità alla soglia del dolore (oltre la quale si hanno danni permanenti); in termini di intensità:

da 10^{-12} watt/m² a 1 watt/m² in termini di pressione sul timpano
da $3 \cdot 10^{-5}$ Pa a 30 Pa

Ricordando che una atmosfera è 10^5 Pa, questo significa che l'orecchio umano è straordinariamente sensibile perché è in grado di rivelare fluttuazioni minime di pressione, inferiori a $1/10^9$ atm.

La sensazione sonora σ avvertita dall'orecchio umano è un po' diversa dal suono fin qui fisicamente definito, in particolare:

- tra intensità sonora e sensazione sonora non vi è relazione lineare
- la sensazione sonora σ , a parità di intensità, dipende anche da altre caratteristiche del suono (ν), legge di Weber-Fechner.

La legge di Weber-Fechner esprime il fatto che l'orecchio umano apprezza variazioni di intensità sonore tanto più piccole quanto minore è l'intensità I , quindi la scala della sensibilità sonora è una scala logaritmica:

$\Delta I = \Delta \sigma I$ cioè $\Delta \sigma = \Delta I/I$ questa relazione integrata porta a

$$\sigma - \sigma_0 = \log I/I_0 \quad (1)$$

dove I_0 rappresenta la minima intensità sonora apprezzabile (10^{-12} W/m^2) e σ_0 è la sensazione sonora corrispondente.

L'unità di misura in questa scala logaritmica sarebbe il bel, ma poiché sarebbe una unità di misura troppo grande, per criteri di comodità, si è deciso di usare il decibel dB:

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B} = \frac{1}{10} \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

Per cui la relazione (1) espressa in dB diventa: $\sigma - \sigma_0 = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$

Nella scala in dB un suono di intensità di 10^{-6} W/m^2 corrisponde a 60 dB, mentre la minima sensazione sonora corrisponde a 0 dB, la soglia del dolore è a 120dB.

Tabella 16.1

Intensità e livello d'intensità di alcuni suoni comuni, con $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

Sorgente	I/I_0	dB	Descrizione
	10^0	0	soglia di udibilità
respirazione normale	10^1	10	appena udibile
stormire di foglie	10^2	20	
bisbiglio sommesso (a 5 m)	10^3	30	molto silenzioso
biblioteca	10^4	40	
ufficio silenzioso	10^5	50	silenzioso
conversazione normale (a 1 m)	10^6	60	
traffico intenso	10^7	70	
ufficio rumoroso con macchine; fabbrica media	10^8	80	
autocarro pesante (a 15 m); Casca- te del Niagara	10^9	90	l'esposizione costante mette in pe- ricolo l'udito
metropolitana (vecchio modello)	10^{10}	100	
rumore di cantiere	10^{11}	110	
concerto rock con amplificatori (a 2 m); decollo di aereo (a 60 m)	10^{12}	120	soglia del dolore
ribaditrice pneumatica; mitraglia- trice	10^{13}	130	
decollo di un aereo (nelle vici- nanze)	10^{15}	150	
grande motore a razzo (nelle vici- nanze)	10^{18}	180	

Consideriamo ora la dipendenza della sensazione sonora dalla frequenza delle vibrazioni

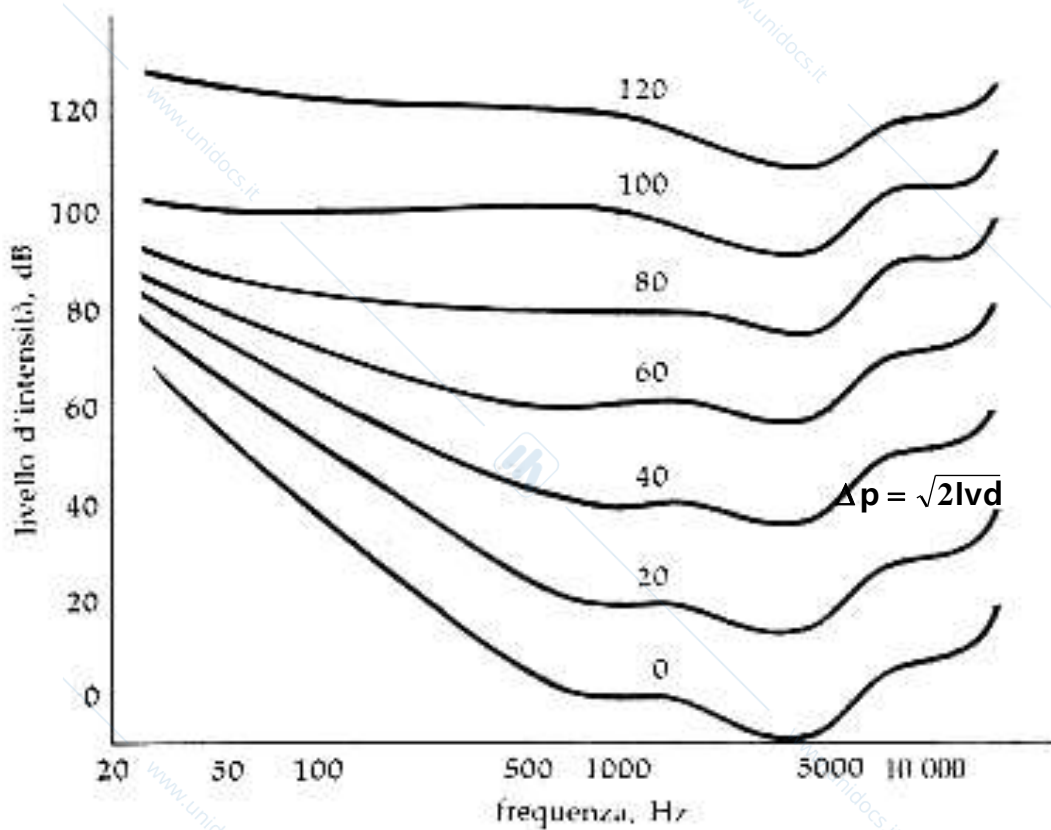


Figura 16.20. Il livello d'intensità in funzione della frequenza per suoni di uguale sensazione sonora (o intensità sonora soggettiva). La curva più in basso rappresenta la soglia di udibilità dell'1% degli individui. La seconda curva dal basso rappresenta all'incirca la soglia di udibilità per il 50% degli individui.

ricordando che: $I = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_0^2}{\rho v d}$ ossia $\Delta p = \sqrt{2I \rho v d}$

Potremo esprimere σ in funzione della pressione $\sigma = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0}$ dB

L'UDITO

Da un punto di vista funzionale si può considerare l'orecchio suddiviso in tre parti; orecchio esterno, orecchio medio, orecchio interno:

L'orecchio esterno (padiglione e canale auricolare) ha funzioni di schermo e di concentrazione delle onde sonore che vengono convogliate sul timpano. Da un punto di vista fisico può essere visto come un risuonatore (assimilabile ad un tubo sonoro chiuso ad una estremità dalla membrana e sede di onde stazionarie) selettivo per le frequenze dell'udibile; nei bambini in cui il canale auricolare è minore vi è maggiore sensibilità per frequenze più elevate.

Ricordando la condizione di risonanza per le onde stazionarie nei tubi

sonori $L = (2k+1)\frac{\lambda}{4}$ ricordando che $L \approx 2,5\text{cm}$

Avremo per la frequenza fondamentale e $v = 340 \text{ m/s}$

$$v = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{4 \cdot 2,5} (2k+1) = 3400 \text{ Hz per } k = 0$$

Che non a caso è nella regione delle frequenze della voce umana. L'orecchio medio (timpano e catena degli ossicini) è un trasduttore meccanico (si passa da aria a liquido) ed agisce come adattatore di impedenza acustica, evitando onde riflesse.

I tre ossicini, martello, incudine e staffa trasmettono la vibrazione sonora, amplificandola alla finestra ovale dell'orecchio interno.

L'orecchio interno (coclea ed annessi) provvede all'analisi delle frequenze delle onde ed alla loro trasformazione in segnali elettrici che attraverso il nervo acustico viaggiano verso il cervello per essere analizzate ed interpretate. La coclea è una struttura canaliforme lunga circa 3,5 cm avvolta a spirale; al suo interno è la membrana basilare fondamentale per la trasduzione del suono in segnali nervosi.

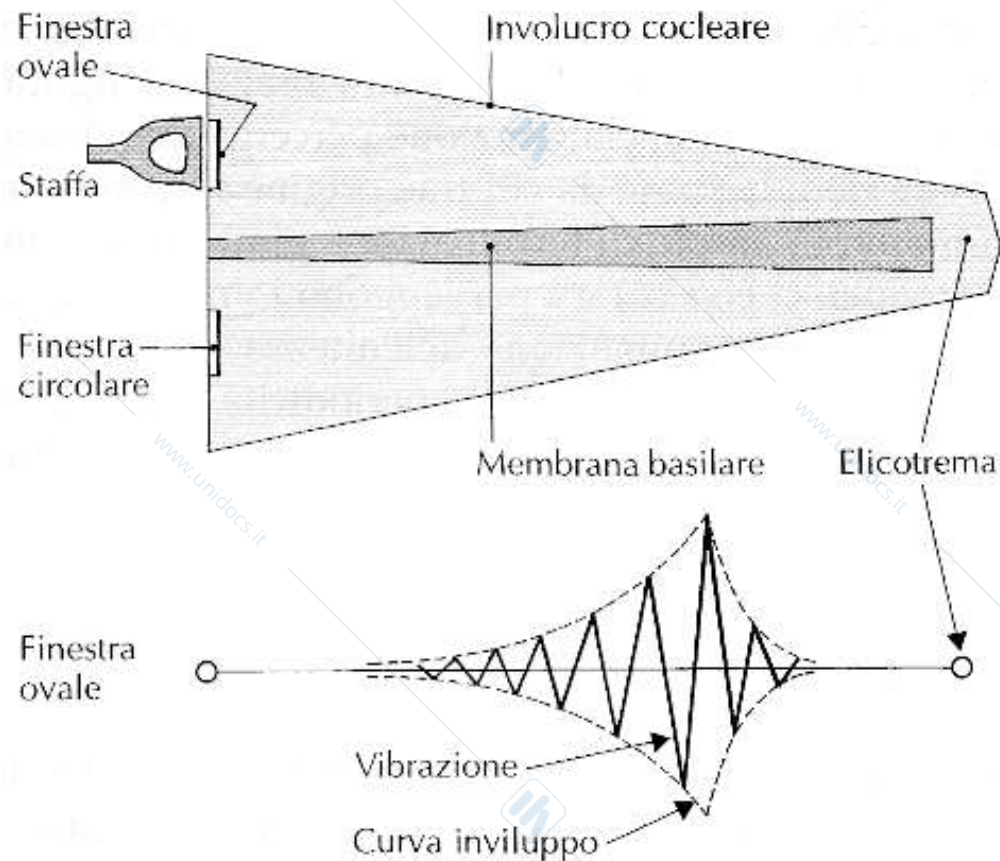


Figura 4.4

In alto: rappresentazione schematica dell'interno della coclea, stesa in linea retta per convenienza grafica. In basso: l'onda meccanica, avviata lungo la membrana basilare per causa del moto della staffa, è sagomata da una curva inviluppo che presenta un massimo in posizione diversa a seconda della frequenza dell'onda.

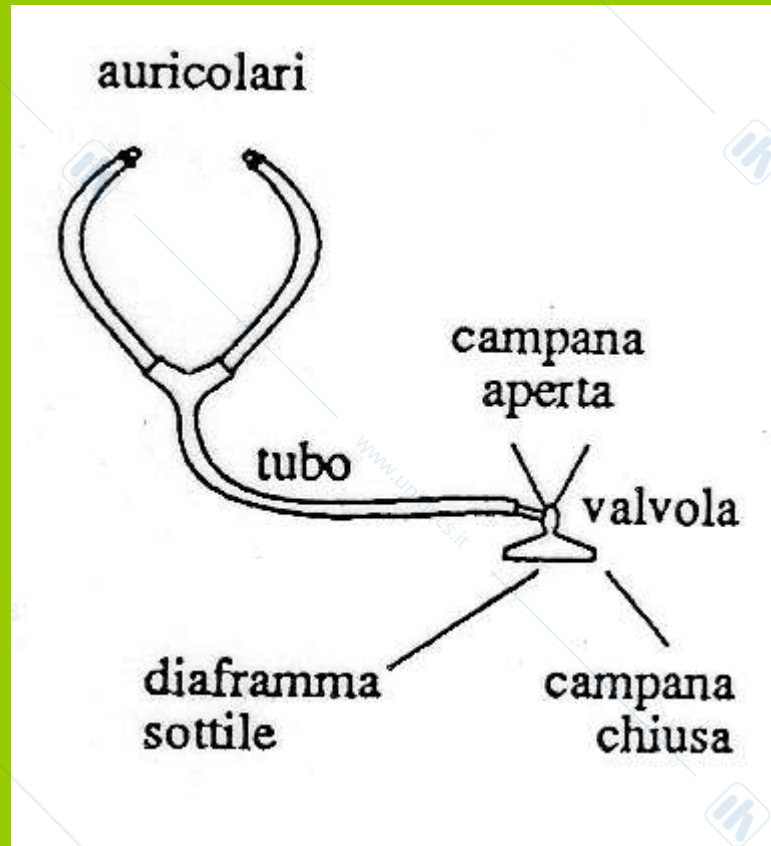
LO STETOSCOPIO

Strumento per auscultazione dei suoni emessi dall'interno del corpo umano inventato da Lennec nel 1818 è costituito da una campana, che può essere aperta o chiusa da un sottile diaframma, da un tubo e da una coppia di auricolari.

La campana aperta agisce da sistema di accoppiamento fra pelle ed aria ed accumula l'energia sonora proveniente dall'area di contatto. La pelle sotto la campana ha una frequenza di risonanza naturale che dipende dalla pressione applicata e dalla dimensione della campana.

La campana chiusa (cioè provvista di diaframma con una determinata frequenza di risonanza) attenua i suoni in bassa frequenza, serve essenzialmente per i suoni polmonari.

Minimizzazione dei volumi e tenuta del sistema



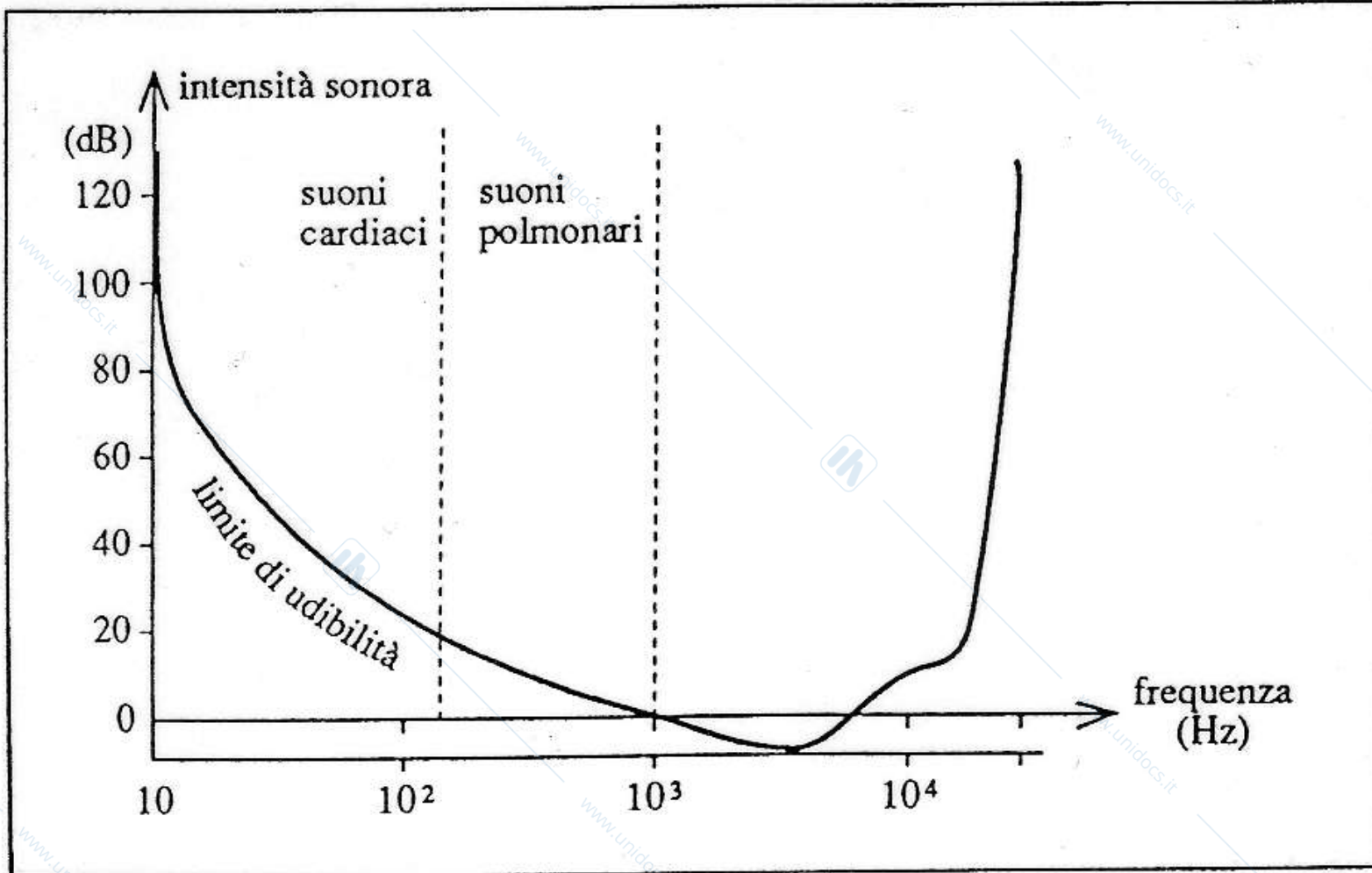


Fig. 15.13. Gran parte dei rumori cardiaci sono a bassa frequenza, nella regione di scarsa sensibilità uditiva. Viceversa i rumori polmonari possiedono in gene-

rale un'alta frequenza. Alcuni rumori del cuore e dei polmoni hanno intensità inferiore alla soglia uditiva dell'orecchio mostrata in figura.

ULTRASUONI IN MEDICINA

$\nu > 10^4$ Hz

Effetto termico localizzato, il fascio di ultrasuoni di debole intensità viene continuamente spostato per non provocare danni

Litotrizzazione, tecnica ad impulsi per la terapia dei calcoli, in odontoiatria per eliminare il tartaro

Ecografia, diagnostica medica che analizza gli echi generati dalle superfici interne dei tessuti

Flussimetria Doppler, sfrutta l'effetto Doppler per avere informazioni sui flussi ematici

Tecniche di sonicazione

