

TRA ACUSTICA E PSICOACUSTICA: IL CONCETTO DI SOGLIA

1

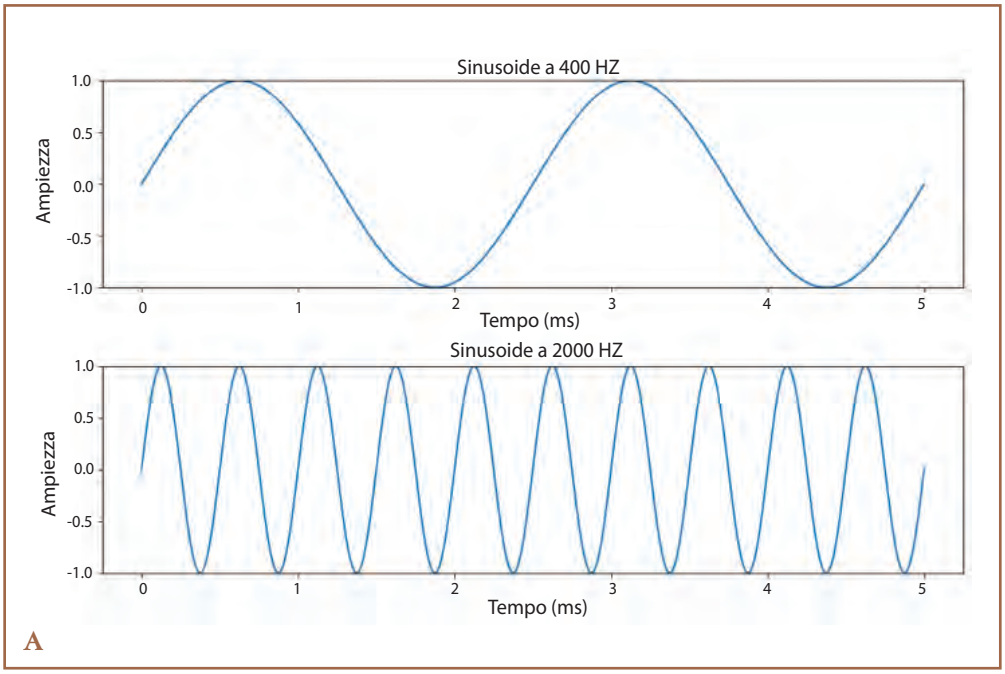
ANTONIO MANCUSO

Premessa

La percezione uditiva è il risultato di un processo cognitivo complesso e articolato. Gli stimoli acustici, che in origine sono semplici grandezze fisiche, vengono dapprima trasformati in segnali bioelettrici, successivamente codificati ed elaborati lungo le vie uditive, e infine interpretati dal cervello. Solo al termine di questo percorso nasce il percetto uditivo, cioè l'esperienza cosciente del suono.

Le grandezze fisiche che descrivono un segnale acustico possono essere rappresentate mediante modelli relativamente semplici; tuttavia, esse si presentano in intervalli di valori estremamente ampi e con una elevata moltitudine di combinazioni che sono specifiche di ogni diversa fonte sonora. Questa ricchezza combinatoria non è utilizzata soltanto per identificare gli oggetti sonori presenti nel panorama acustico (cosa produce quel suono, dove si trova, come si muove), ma ha consentito lo sviluppo di ben due sistemi di comunicazione altamente strutturati: il linguaggio musicale e, successivamente, il linguaggio verbale. Il linguaggio verbale, in particolare, è strettamente connesso alle capacità cognitive tipiche della specie umana, come l'elaborazione simbolica.

Ne deriva l'importanza della funzione uditiva per lo sviluppo e il mantenimento delle capacità intellettive, relazionali e comunicative. Un'alterazione uditiva non riguarda quindi soltanto la percezione di un fenomeno fisico, ma può avere ripercussioni profonde sull'organizzazione cognitiva e sulla vita sociale dell'individuo. Affinché questo processo percettivo avvenga in modo efficace, non è sufficiente una percezione generica del fenomeno fisico, come accade per altre modalità sensoriali (ad esempio la temperatura). Nell'udito ogni aspetto del segnale viene codificato: la provenienza spaziale, il contenuto spettrale, l'andamento temporale, le modalità di inizio e di fine. Il sistema cognitivo costruisce il percetto uditivo sulla base di queste codifiche, secondo una serie di principi e percorsi descritti dalla teoria dell'Analisi della Scena Uditiva (ASA).



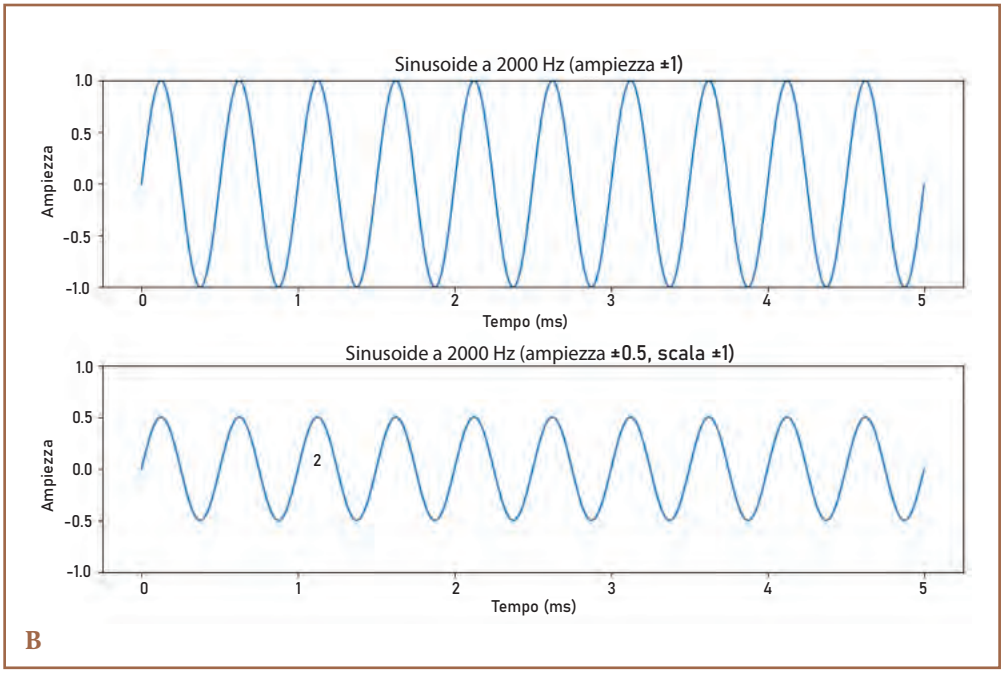


FIGURA 1.1.
A) Due vibrazioni semplici (sinusoidali) con diversa frequenza e stessa ampiezza, che danno luogo a percezioni di suoni con diversa altezza e circa la stessa intensità. B) Sono rappresentate due vibrazioni semplici con ampiezza diversa e stessa frequenza che danno luogo a percezioni di suoni con la stessa altezza ma intensità diversa.

Questo processo si articola su più livelli: dalle componenti elementari del suono fino ai raggruppamenti complessi che costituiscono il parlato o la musica. Sebbene l'esperienza sonora sia prevalentemente composta da stimoli complessi, tali complessità derivano quasi sempre dalla combinazione di fenomeni semplici. Anche dal punto di vista acustico, infatti, i segnali complessi possono essere descritti come la sovrapposizione di oscillazioni elementari. Per questa ragione ha senso iniziare lo studio della funzione uditiva partendo dagli elementi più semplici, come avviene anche nella prassi clinica che inizia con l'esame audiometrico tonale, per poi passare a valutazioni più complesse, come nei test di percezione del parlato.

Contenuti fisici dei segnali acustici

I segnali sonori sono onde di pressione generate dalle vibrazioni di corpi fisici, come una corda vibrante o il movimento della glottide. Tali vibrazioni derivano da fenomeni di elasticità e si propagano attraverso l'ambiente circostante sotto forma di onde sonore sia nei solidi elastici, sia attraverso l'aria, che si si comporta come un mezzo elastico. Nei sistemi elastici, le forze elastiche producono movimenti periodici. L'ampiezza della vibrazione dipende dall'energia fornita al sistema, mentre la periodicità del movimento, o il suo inverso (la frequenza, che indica il numero di periodi nell'unità di tempo), dipende dalle caratteristiche fisiche del corpo vibrante, in particolare massa ed elasticità. Il moto periodico più semplice è quello sinusoidale, completamente descritto da due grandezze: ampiezza e frequenza. L'ascolto di un suono così semplice, chiamato tono puro, genera due sensazioni fondamentali:

- la sensazione di intensità (loudness), legata all'ampiezza della vibrazione
- la sensazione di altezza (pitch), legata alla frequenza, che consente di collocare il suono su una scala musicale (**Figura 1.1**).

Una terza sensazione è poi quella della durata che dipende dalla lunghezza temporale dello stimolo acustico. In natura è piuttosto difficile ascoltare toni puri, che normalmente vengono generati con sistemi artificiali e utilizzati per scopi diagnostici o di laboratorio. I corpi vibranti in natura infatti sono strutturalmente complessi e producono vibrazioni altrettanto complesse. Fortunatamente, qualsiasi vibrazione complessa può essere descritta come la somma di vibrazioni semplici di opportune frequenze e ampiezze (questa attività prende il nome di analisi spettrale). In molti sistemi vibranti quali gli strumenti musicali le frequenze componenti sono multiple intere di una frequenza fondamentale e prendono il nome di armoniche. In questi casi anche in assenza della fondamentale, la periodicità globale del segnale rimane determinata da essa (**Figura 1.2**) e quindi induce la percezione dell'altezza. L'ascolto di un suono periodico complesso genera quindi tre sensazioni:

- la sensazione di intensità, legata all'ampiezza globale delle vibrazioni;
- la sensazione di altezza, solo se il segnale acustico presenta una periodicità;
- il timbro, legato alla miscela delle componenti frequenziali che compongono il segnale e in particolare alla loro evoluzione temporale (quali frequenze, con quali rapporti di ampiezza e come varia la loro ampiezza nel tempo).

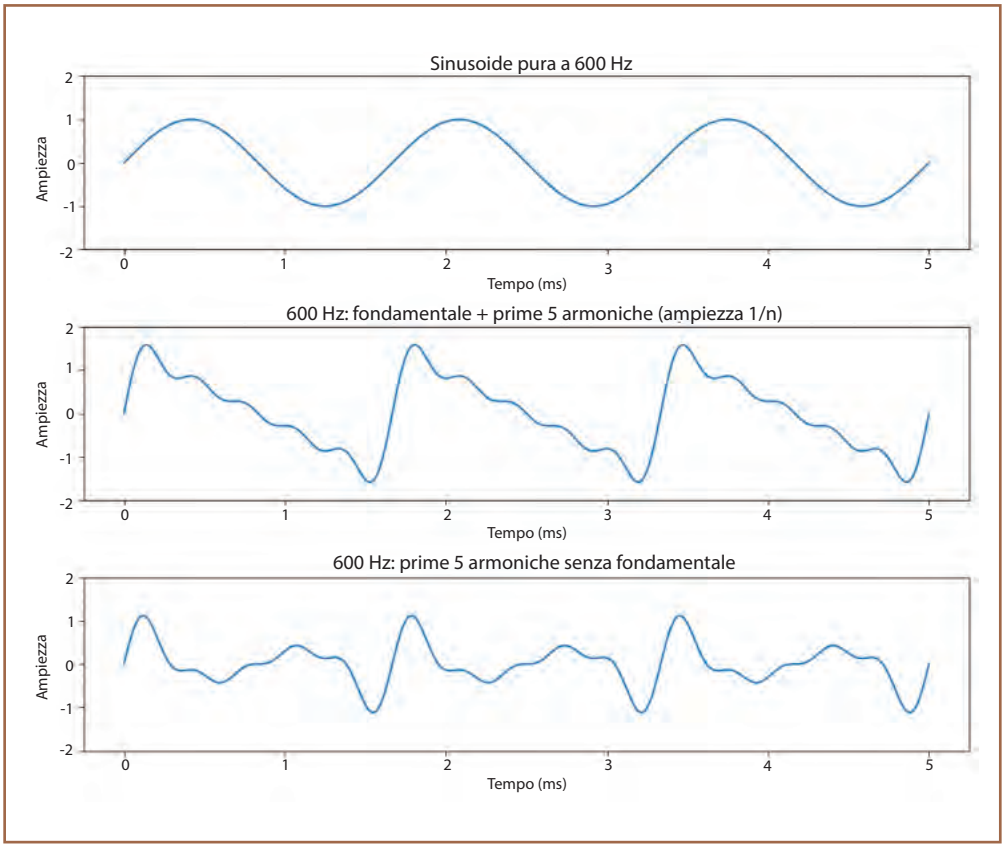


FIGURA 1.2.
In alto un suono sinusoidale; al centro un suono con stessa fondamentale e le prime 5 armoniche, e in basso lo stesso suono senza la fondamentale. La periodicità del fenomeno è sempre la stessa.

Ogni suono presenta infatti un proprio modo caratteristico di iniziare, evolvere e terminare. Questa evoluzione temporale, detta inviluppo, deriva dalla variazione nel tempo dell'ampiezza delle singole componenti frequenziali, che spesso seguono andamenti differenti. Le vibrazioni prive di periodicità non generano una sensazione di altezza e vengono classificate come rumori. Nella maggior parte degli oggetti sonori naturali suoni e rumori coesistono, come nel pianoforte, dove al rumore della percussione segue la vibrazione armonica della corda. Ogni segnale acustico può quindi essere descritto da due andamenti fondamentali (**Figura 1.3**):

- la struttura temporale fine (TFS) che descrive fedelmente il movimento del sistema;
- l'inviluppo, che descrive globalmente l'andamento temporale dell'intensità.

Poiché i diversi oggetti sonori producono vibrazioni differenti, le componenti frequenziali di un suono e i rispettivi rapporti di ampiezza ne determinano il contenuto (COSA) e ci permettono di identificare l'oggetto che le ha prodotte mentre l'intensità generale del fenomeno, legata all'energia meccanica, ne è un attributo (COME).

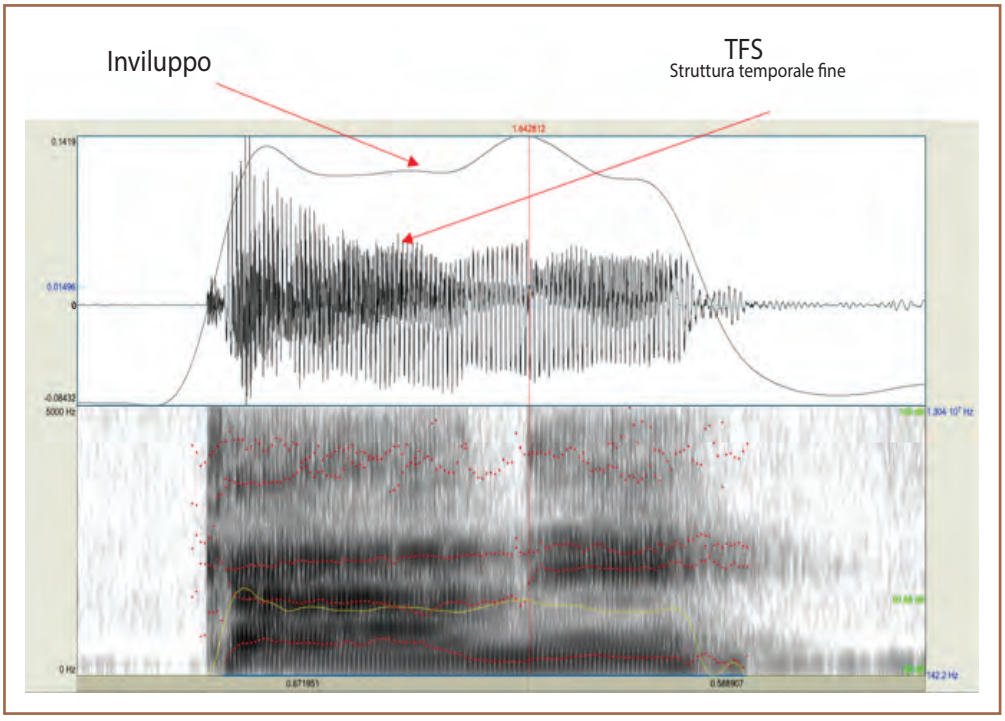


FIGURA 1.3.
In alto la forma d'onda di un segnale sonoro espresso come variazione della pressione nel tempo e caratterizzata dalla struttura temporale fine (TFS) cioè la curva che descrive esattamente l'andamento della pressione nel tempo, e da una funzione detta Inviluppo, che descrive nel tempo l'andamento dell'intensità del segnale. In basso invece l'analisi spettrale dello stesso segnale, che mostra nel tempo (ascisse) come l'energia contenuta nel segnale si distribuisca nelle varie frequenze (ordinate). L'intensità delle singole componenti frequenziali è invece rappresentata dalla sfumatura di nero delle linee.

Gli oggetti uditivi e la risoluzione in frequenza

Il compito primario del sistema uditivo è rappresentare correttamente il panorama acustico in termini di oggetti uditivi, determinando per ciascuno che cosa è e dove si trova anche quando le diverse fonti si manifestano contemporaneamente. Questo significa non solo tradurre fedelmente i segnali sonori ma anche e soprattutto mettere in risalto quelli più importanti per gli aspetti cognitivi e comportamentali. Un oggetto uditivo è un costrutto percettivo attribuibile a una specifica sorgente sonora; la scena uditiva è l'insieme dinamico di tali oggetti.

Per estrarre quindi i contenuti dei segnali acustici, cioè le informazioni che ci servono ad esempio a distinguere i diversi rumori in natura, o le differenti note di una melodia o ancora i diversi fonemi del linguaggio è necessario estrarre dalla TSF le informazioni su quali sono le componenti frequenziali e come si evolvono nel tempo. In altre parole, è necessario rappresentare come l'energia acustica si distribuisce nel dominio delle frequenze e come tale distribuzione evolve nel tempo.

La separazione delle componenti frequenziali avviene lungo la membrana basilare con un procedimento piuttosto articolato che fa corrispondere ad ogni gamma di frequenze una opportuna serie di circuiti neurosensoriali. Ogni porzione della membrana alimenta un insieme di fibre con una propria specializzazione in frequenza, che può essere rappresentata dalla propria specifica curva di sintonia (**Figura 1.4**).

Ogni curva di sintonia illustra il comportamento dei rispettivi circuiti sensoriali al variare della frequenza di stimolazione e dell'ampiezza dello stimolo. Perciò si può notare che i circuiti neurosensoriali che sono deputati al trattamento dei suoni gravi necessitano di una certa energia per essere attivati ma sono sensibili a una gamma di frequenze ampia mentre quelli che trattano i suoni pi acuti si attivano con molta meno energia ma sono molto più selettivi rispetto alle frequenze. Questa organizzazione consente al sistema uditivo di trattare simultaneamente più componenti spettrali, mantenendole distinte lungo tutto il percorso fino alla corteccia uditiva.

Una volta che le varie componenti sono state isolate e codificate separatamente, è poi necessario attribuire ogni componente alla rispettiva fonte per ricostruire il singolo oggetto uditivo. Per questo, un insieme di altri circuiti neurosensoriali presenti nel tronco encefalico e nella corteccia, estrae ulteriori informazioni dai ogni singola componente (da dove proviene, quando inizia, come si evolve) e inizia un complesso processo volto a isolare dagli altri i segnali che hanno proprietà comuni e quindi presumibilmente provengono dalla stessa fonte (segregazione).

Ogni insieme di segnali così selezionati deve poi essere condensato in una sensazione sintetica corrispondente all'oggetto sonoro che l'ha prodotta (quel gruppo di frequenze è una certa nota di pianoforte) e questo processo prende il nome di raggruppamento o integrazione.

I meccanismi mediante i quali processi di segregazione e integrazione avvengono prendono il nome di Analisi della Scena Uditiva; non sono specifici dell'udito ma sono analoghi a quanto avviene per il sistema visivo e coinvolgono sia le strutture cerebrali centrali che quelle periferiche (**Figura 1.5**).

In sintesi, ascoltando ad esempio un suono di uno strumento musicale all'interno di un ambiente rumoroso, le componenti frequenziali che la coclea ha indirizzato su diversi canali vengono analizzate e quelle che contengono segnali che iniziano nello stesso istante e derivano dalla stessa posizione o hanno un rapporto armonico fra di loro (il pianoforte) vengono separate dagli altri segnali e integrate in una percezione sintetica (la nota del pianoforte). Lo stesso succede per il parlato con meccanismi analoghi.

I meccanismi di segregazione e integrazione vengono anche utilizzati per gli sviluppi temporali dei segnali sonori e permettono a livello più complesso di seguire un discorso parlato o una melodia musicale e consentono anche di migliorare l'ascolto isolando il segnale (target) dal rumore circostante, ad esempio, nelle situazioni di ascolto più complesse.

La risoluzione in frequenza non serve quindi soltanto a "sentire" una determinata altezza isolata, ma è fondamentale per la segregazione e l'integrazione delle componenti dei suoni complessi.

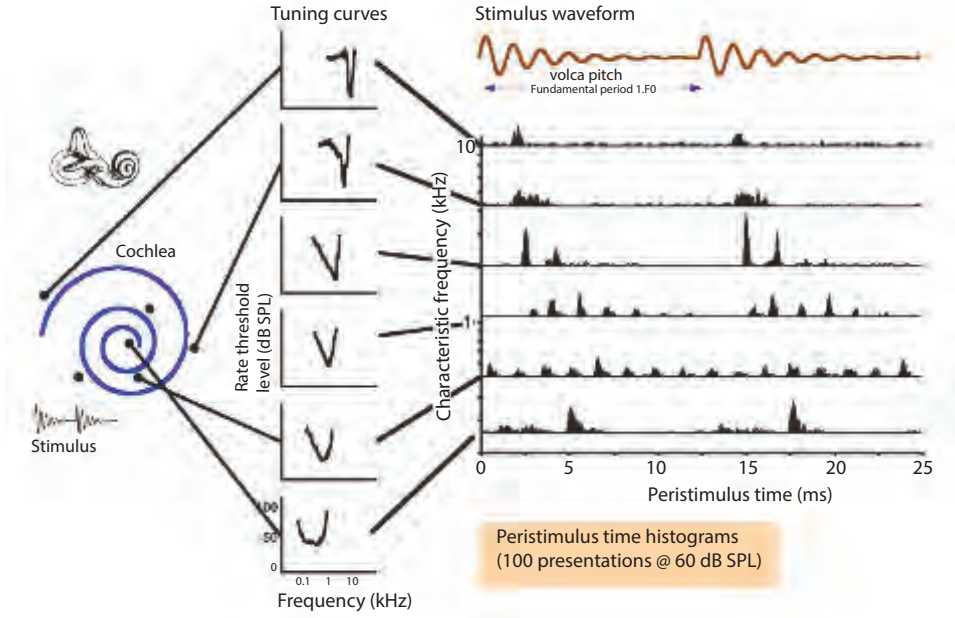


FIGURA 1.4.
Trasduzione dei segnali acustici da parte della coclea, rappresentazione tonotopica, curve di sintonia e codifica frequenziale.

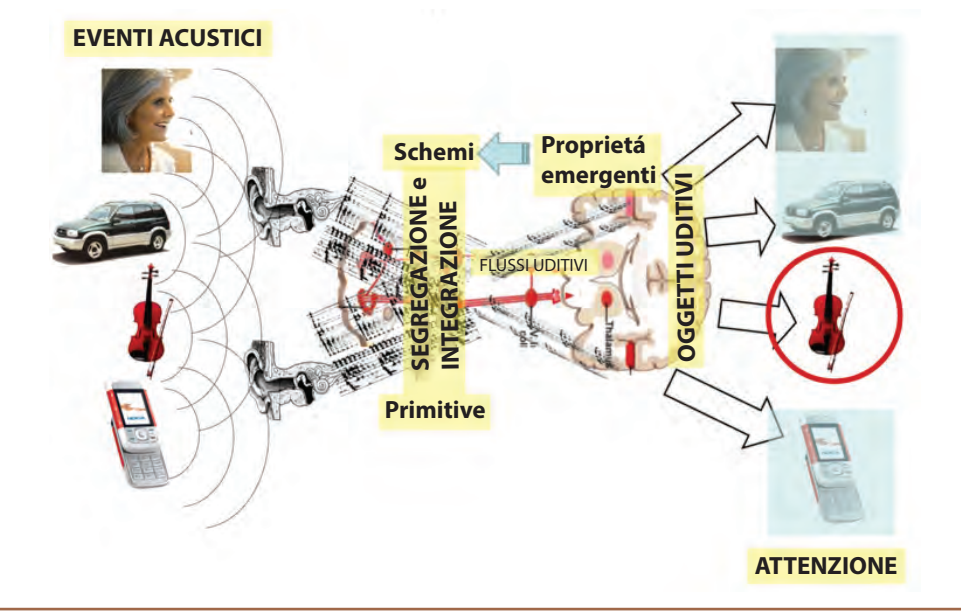


FIGURA 1.5.
Analisi della scena uditiva.

La psicoacustica e le soglie uditive

La natura delle trasformazioni che permettono di arrivare alla percezione degli oggetti sonori riveste un carattere inevitabilmente personale, poiché dipende da fattori fisiologici e meccanismi neurosensoriali alcuni dei quali innati e altri invece frutto del condizionamento e del contesto culturale; tuttavia, esistono regolarità condivise che permettono di definire una normalità funzionale in specifiche condizioni di ascolto.

La psicoacustica studia le relazioni fra le proprietà fisiche dei suoni e le sensazioni uditive che esse evocano, nel tentativo di determinare quali sono statisticamente le prestazioni del sistema uditivo rispetto alle grandezze fisiche e gli ambiti nelle quali si manifestano.

Gli elementi fondamentali riguardano le due dimensioni principali dell'ascolto, altezza e intensità, nell'intento di delimitare il campo dei suoni udibili, definire la capacità di discernere variazioni, indagare le mutue relazioni fra le due grandezze e le dipendenze da altri fattori. Per caratterizzare queste relazioni si utilizzano due costrutti a carattere statistico: la soglia assoluta, definita come il valore della grandezza fisica al disopra del quale si ha una risposta da parte del sistema uditivo (sento non sento) e la soglia differenziale, ovvero la minima variazione percepibile di un parametro fisico.

Nell'ambito delle soglie assolute, per "soglia uditiva" si intende la più piccola intensità di un suono in grado di suscitare la più piccola sensazione uditiva. In una rappresentazione astratta e semplificata, la soglia potrebbe essere immaginata come una linea che divide lo spazio percettivo in due regioni: da un lato l'area della non-percezione, dall'altro quella della percezione. In realtà, questa linea di separazione non è netta. La soglia uditiva non è un valore fisso, ma un prodotto percettivo, risultante da una catena di processi bioacustici, neurologici e cognitivi che, istante per istante, possono fornire esiti differenti. Per questo motivo non esiste una soglia sensoriale assoluta, ma piuttosto diversi modi di stimare la soglia. Nella pratica clinica e sperimentale, misure di soglia ottenute in condizioni apparentemente identiche possono differire fra loro in funzione di variazioni procedurali, dell'ordine di presentazione degli stimoli o anche semplicemente in occasione di un nuovo test. Questa variabilità non è in contraddizione con l'elevatissima sensibilità del sistema uditivo umano, ma riflette il fatto che la percezione è mediata da processi cognitivi come l'attenzione, lo stato di vigilanza e i criteri decisionali del soggetto.

La caratteristica fondamentale della soglia uditiva è la sua dipendenza dalla frequenza. Il sistema uditivo umano non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze come testimoniato dalla diversità delle curve di sintonia: la massima sensibilità si colloca tipicamente tra 1 e 4 kHz, mentre alle frequenze gravi e acute la soglia aumenta progressivamente. Questa variabilità riflette le proprietà meccaniche della coclea, l'organizzazione tonotopica, la diversità delle singole curve di sintonia e la diversa rilevanza funzionale delle varie bande di frequenza per la comunicazione acustica, in particolare per il parlato.

La soglia dipende anche dalla durata dello stimolo. Per stimoli di durata sufficientemente lunga (superiore a circa 200-300 ms), la soglia rimane relativamente costante.