



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTA' DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E  
SCIENZE MATEMATICHE

***VALUTAZIONE DELLA PERCEZIONE  
SOGGETTIVA DELLA MUSICA***

*Evaluation of sound quality of the music track*

*Relatore:*

Ing. Fabio Serpilli

*Tesi di Laurea di:*

Leonardo Di Virgilio

*Correlatore:*

Ing. Valter Lori

---

Anno accademico 2020/2021

Dedicato ai miei genitori,  
a mia sorella, e a tutti coloro  
che hanno creduto in me.

# INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUZIONE .....</b>                         | <b>6</b>  |
| <b>IL SUONO.....</b>                              | <b>8</b>  |
| Apparato uditivo umano .....                      | 10        |
| Orecchio esterno.....                             | 11        |
| Orecchio medio .....                              | 13        |
| Orecchio interno.....                             | 14        |
| <b>GRANDEZZE ACUSTICHE .....</b>                  | <b>15</b> |
| Livelli nel Tempo .....                           | 15        |
| Le curve di Ponderazione .....                    | 16        |
| <b>GRANDEZZE PSICOACUSTICHE.....</b>              | <b>18</b> |
| Bande critiche.....                               | 18        |
| Loudness .....                                    | 18        |
| Fluctuation Strenght .....                        | 23        |
| Roughness .....                                   | 26        |
| Sharpness.....                                    | 29        |
| Tonality.....                                     | 31        |
| <b>ASCOLTO BINAURALE E PERCEZIONE SONORA.....</b> | <b>33</b> |
| La localizzazione spaziale .....                  | 35        |
| ITD .....   | 35        |
| ILD .....   | 37        |
| Internalizzazione ed esternalizzazione.....       | 39        |
| Percezione azimutale.....                         | 40        |
| Teoria duplex .....                               | 40        |
| Percezione dell'elevazione .....                  | 41        |
| Percezione della distanza .....                   | 42        |
| Pitch Perception .....                            | 44        |
| Loudness Perception .....                         | 45        |

|   |           |
|---|-----------|
| La norma ISO .....                              | 45        |
| Timbre Perception.....                          | 49        |
| <b>LA TEORIA DEL SOUND QUALITY .....</b>        | <b>51</b> |
| Test di ascolto .....                           | 52        |
| Risultati dell'analisi soggettiva del test..... | 55        |
| <b>CONCLUSIONI .....</b>                        | <b>60</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>                        | <b>61</b> |

## Indice delle figure

|  |
|--|
| Fig.1.1 Composizione VIII Vasilij Vasil'evič Kandinskij  |
| Fig. 1.1 Struttura orecchio esterno  |
| Fig. 2.1 Orecchio medio  |
| Fig. 4.1 Orecchio interno  |
| Fig. 1.2 Le curve di Ponderazione  |
| Fig. 2.2 Le isofoniche di Fletcher e Munson  |
| <i>Fig. 3.2 Attenuazione in dB da applicare in campo diffuso</i>   |
| <i>Fig. 4.2 Andamento della Loudness specifica in funzione della frequenza</i>   |
| <i>Fig. 5.2 Modello per fluctuation strength e roughness</i>   |
| Fig. 6.2 Andamento della fluctuation strength per orecchio destro e sinistro   |
| <i>Fig. 7.2 Andamento della roughness con il grado di modulazione, valori in %, per un tono di 1kHz con 60 dB Spl e frequenza di modulazione pari a 70 Hz</i>                                    |
| <i>Fig. 8.2 Variazione della roughness al variare della frequenza di modulazione in ampiezza e della frequenza centrale del tono, con modulazione al 100%, livello spl costante pari a 60 dB</i> |
| <i>Fig. 9.2 Andamento del peso <math>g(z)</math> al variare del numero di Bark</i>   |
| <i>Fig. 10.2 Andamento della sharpness per orecchio destro e sinistro</i>  |
| Fig. 1.3 Percezione binaurale  |
| Fig.2.3 Differenza percettiva in base ai gradi   |
| Fig. 3.3 manichino da laboratorio  |
| Fig. 4.3 Stima dell'ITD in caso di sorgente a onde piane distante e testa sferica  |

*Fig. 5.3 Valutazione dell'ITD in base ai gradi di angolazione*

*Fig. 6.3 Differenze della percezione in base agli angoli di posizionamento della sorgente*

*Fig. 7.3 Percezione sull'asse x,y,z*

*Fig. 8.3 Scala dei tempi e luogo di elaborazione per le sensazioni*

*Fig. 9.3 Audiogrammi di Fletcher-Munson*

*Fig. 10.3 Parametri per curve isofoniche*

*Fig. 11.3 Differenza tra suono grave e suono acuto*

*Fig. 1.4 Valutazione per genere, età, tipo di ascoltatore*

*Fig. 2.4 Sensazioni e preferenze*

*Fig. 3.4 Grafico a torta per genere*

*Fig. 4.4 Grafico a torta per età*

*Fig. 5.4 Risultati definitivi*

*Fig. 6.4 Correlazioni tra sensazioni e giudizi finali*

## INTRODUZIONE

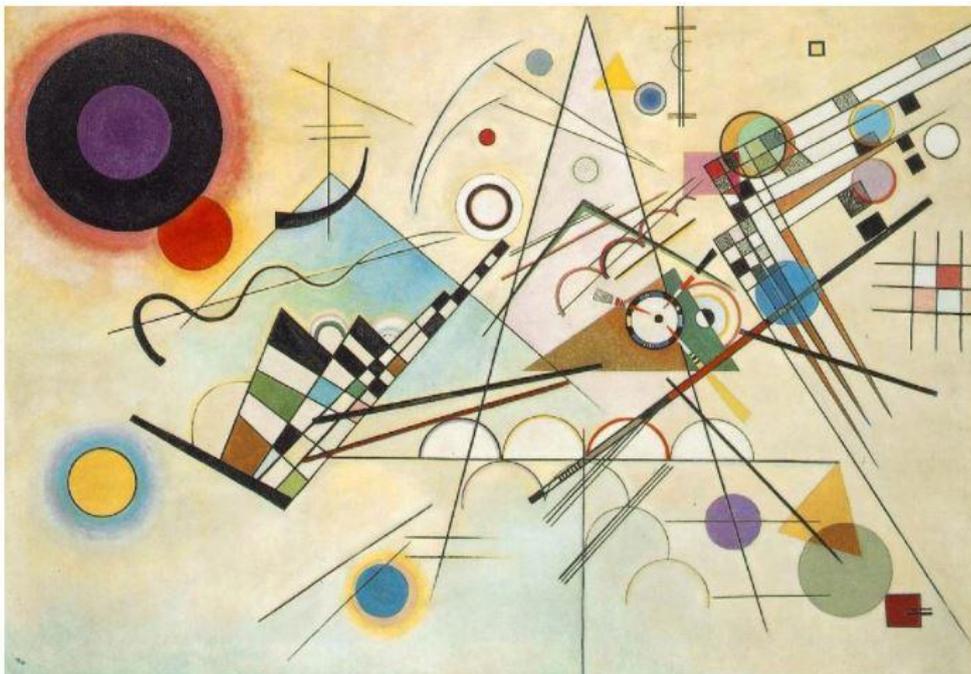
Negli anni, grazie all'evoluzione e notevoli studi, possiamo affermare che sono discretamente conosciuti i meccanismi per i quali le vibrazioni acustiche dell'ambiente aereo esterno vengono tradotte in impulsi nervosi, così come quelli della conduzione di questi, dai recettori periferici al nostro cervello; non si può però dire lo stesso per quanto riguarda tutti quei meccanismi che intervengono per trasformarli in sensazioni coscienti. A tal motivo nasce la psicoacustica (che è un ramo della psicofisica), una scienza che studia il comportamento dei meccanismi fisiologici e psicologici che intervengono nella percezione uditiva. Il termine "psicoacustica" venne coniato per la prima volta nel 1860 da Gustav Fechner, nel suo libro "Elements Of Psychophysics". In questo lavoro di tesi andremo ad osservare gli aspetti della percezione sonora, cioè, alle modalità secondo le quali il sistema uditivo umano valuta le grandezze acustiche. L'informazione trasmessa da uno stimolo sonoro è molto complessa e articolata: essa coinvolge infatti diversi ambiti che spaziano da quello meramente fisico a quello cognitivo, passando per l'informazione spaziale e per gli aspetti psicoacustici. Non esistono quindi solo suoni più o meno forti, oppure suoni che trasmettono informazioni intelligibili quali quelle contenute in un messaggio vocale, ma anche suoni la cui informazione trasmessa è legata alla direzione di provenienza degli stessi (ad esempio il rumore di una vettura che sopraggiunge alle nostre spalle mentre camminiamo sulla strada ci indica una possibile situazione di pericolo), oppure suoni che forniscono informazioni -quasi subliminali- di allarme, di sicurezza o di benessere. L'argomento della percezione sonora è quindi molto complesso.

Diversi studi hanno dimostrato come suoni percepiti dal feto all'interno del grembo materno, si rivelano generalmente messaggeri di una condizione di sicurezza e di rilassamento, anche se riascoltati successivamente in età pre-scolare o addirittura da adulti. Altri studi hanno evidenziato come specifici suoni creduti ormai perduti, in quanto legati ad oggetti del passato, restano nelle pieghe della memoria anche dopo molti decenni, e vengono ricordati talvolta con nostalgia. Lo scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di analizzare come le grandezze psicoacustiche siano correlate con i suoni prodotti da diversi strumenti musicali. Per tale ragione si è indagato quanto la percezione e gli stimoli dell'essere umano incidano sulla valutazione della qualità sonora. Per fare ciò si è costruito un test d'ascolto finalizzato a raccogliere le impressioni dell'ascoltatore su un brano di musica italiana opportunamente selezionato; ( wav 16 bit 44.1 KHz ). La

traccia è rappresentativa del caso studio in termini di loudness e tone. I risultati del test d'ascolto saranno successivamente processati e correlati con le grandezze psicoacustiche di riferimento : Loudness [ Phone], Sharpness [acum], Roughness [asper], fluctation strenght [vacil].

## IL SUONO

Il suono è un fenomeno fisico che stimola il senso dell'udito: esso è provocato dal rapido movimento (vibrazione) di un qualsiasi corpo (una corda, un elastico, un pezzo di legno, una colonna d'aria, ecc.). I suoni sono onde create da vibrazioni ottenute in migliaia di modi diversi, che generano una variazione di pressione che si propaga all'interno di un mezzo materiale senza trasporto di materia, (ad es. nel vuoto non c'è suono). Per esistere ha bisogno di una sorgente, cioè di un corpo vibrante e di un mezzo elastico di propagazione in cui le onde possano viaggiare. Come già detto all'origine del suono c'è un corpo vibrante, questo corpo trasmette le proprie vibrazioni al mezzo che lo circonda (nel nostro caso, l'aria). Il moto delle particelle genera l'onda ed il suono si propaga sotto forma di onda sonora. Le onde sonore prodotte provocano dei movimenti periodici delle molecole d'aria formando strati alternati di aria compressa e rarefatta che si propagano in tutte le direzioni fino ad arrivare al nostro orecchio.



*Fig.1.1 Composizione VIII Vasilij Vasil'evič Kandinskij*

Kandinsky riteneva che ogni forma e ogni colore avessero attinenza con la musica, in un rapporto di sinestesia, cioè di collegamento fra sfere sensoriali differenti. In questo dipinto si può infatti immaginare che ogni forma e ogni intervento cromatico abbiano un significato anche musicale, un ritmo e un'armonia, come se fossero un suono cristallizzato dentro la tela.

L'importanza della qualità sonora è diventata sempre più influente nel mondo odierno tanto da far sì che anche le istituzioni abbiano dato un ruolo fondamentale al sound quality, ad esempio nella progettazione di elettrodomestici o qualsiasi altro oggetto di uso comune, ma anche per assicurare una qualità di vita adeguata ai cittadini che si trovano a vivere e lavorare in una società dove qualsiasi cosa produce un suono. Per tale ragione sono state emanate delle norme in materia di inquinamento acustico che fissano limiti di rumorosità massima che mirano sostanzialmente alla realizzazione di un ambiente di vita più silenzioso, e quindi più confortevole. Al fine di rispondere quindi sia alle prescrizioni indicate nelle norme, sia alle aspettative del mercato, i costruttori di macchine ed impianti di ogni tipo, impiegano molte energie al fine di ridurre il più possibile le emissioni sonore dei propri prodotti. Oltre al valore numerico che indica la quantità di rumore emesso, ad esempio da un impianto di climatizzazione, vi sono però anche altre caratteristiche acustiche che, se opportunamente studiate ed ottimizzate, possono rivestire un ruolo importante nel miglioramento complessivo del prodotto. E' infatti assodato che, a parità di livello di potenza sonora espresso in dB, alcuni rumori possono risultare all'orecchio più gradevoli ( o, in alcuni casi, meno fastidiosi) di altri. E' inoltre palese come il citato aspetto acustico, rivesta un ruolo particolarmente importante per quelle installazioni che sono destinate a funzionare in ambienti abitativi o in prossimità di essi, per diverse ore nell'arco di una giornata, come avviene ad esempio per gli impianti di climatizzazione. La progettazione quindi di una emissione sonora che, oltre a rispettare i requisiti di legge, abbia anche le citate caratteristiche di 'gradevolezza', è certamente un traguardo ambito, e che migliora il giudizio globale di un prodotto. Lo studio di questo particolare aspetto acustico è conosciuto con il nome di sound quality o qualità del suono. Al fine di realizzare l'ottimizzazione qualitativa del rumore emesso da un oggetto, è però necessario disporre di opportuni descrittori oggettivi che consentano una agevole interpretazione dei dati acustici acquisiti. Diversamente ci si troverebbe ad avere confrontare gli spettri in frequenza relativi ai diversi rumori da analizzare, con i giudizi dati a questi ultimi da un campione di persone, ricercando una correlazione tra quanto appare sullo schermo di un analizzatore di spettro e quanto dichiarato dalla giuria di ascoltatori. Tra l'altro, l'analisi si complicherebbe notevolmente nel caso di indagini su rumori non costanti nel tempo o contenenti modulazioni di ampiezza o di frequenza. Allo scopo di semplificare il lavoro è possibile ricorrere ad una serie di descrittori legati alla percezione umana del rumore, che ne analizzano

più in dettaglio alcune particolari caratteristiche e che vengono normalmente utilizzati in questo tipo di indagini. Tra questi citiamo ad esempio il loudness ('sonorità', che fornisce un'indicazione relativa all'intensità del suono percepito) e che viene espresso in phon, lo sharpness (letteralmente 'affilatura', legato al modo in cui il rumore è distribuito in funzione della frequenza) che viene espresso in acum, la fluctuation strength ('fluttuazione', che è correlata alle modulazioni di ampiezza o di frequenza del suono) che viene espressa in vacil, il roughness ('asprezza' che indica appunto l'asprezza del suono) e che viene indicata in asper. Poiché ci si muove nel campo della psicoacustica, ossia di quella parte dell'acustica che lega gli stimoli acustici alla sensazione sonora percepita dall'uomo, è importante avere la possibilità di effettuare registrazioni che si avvicinino il più possibile a quanto realmente percepito attraverso l'orecchio umano. Per fare ciò viene normalmente eseguita una registrazione binaurale. Con questo termine si intende la registrazione sonora effettuata per mezzo di un apposito simulatore di testa e torso, dotato di padiglioni auricolari che convogliano le onde sonore sulla membrana del microfono posto all'interno del condotto uditivo.

## **Apparato uditivo umano**

Il sistema uditivo umano ha una struttura complessa e può svolgere varie funzioni: non solo è in grado di elaborare un ampio insieme di stimoli, ma è in grado di identificare precisamente alcune caratteristiche fisiche del suono, come ad esempio l'altezza o il timbro di un suono, nonché la direzione da cui esso proviene. Molte funzioni del sistema uditivo vengono svolte dall'organo che chiamiamo "orecchio".

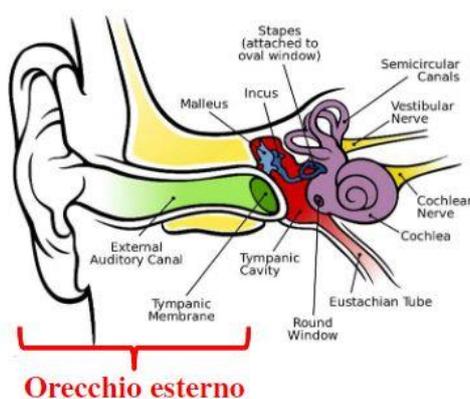
Molti erroneamente, intendono con il termine orecchio solo la parte visibile, ma in realtà è un complesso di tre diversi elementi: orecchio esterno, orecchio medio e orecchio interno. Questi tre insieme permettono di trasformare una variazione della pressione dell'aria provocata da una sorgente vibrante, in un impulso elettrico capace di generare, a livello cerebrale, la sensazione sonora. Data la sua funzione, si può dire che l'orecchio è un trasduttore, cioè un apparato in grado di convertire una grandezza fisica in un'altra alterandone alcune delle caratteristiche che la identificano.

In sostanza possiamo dire brevemente che quando un'onda sonora arriva ad incidere sull'orecchio esterno, una parte di essa viene direzionata attraverso il canale auditivo verso la membrana timpanica. La membrana comincerà ad oscillare per effetto delle perturbazioni di pressione e metterà in moto un sistema di ossicini fra cui il martello,

l'incudine e la staffa; il loro movimento viene trasmesso alla finestra ovale, che a sua volta perturba il fluido all'interno della coclea. Le perturbazioni vengono trasformate in segnale elettrici dal nervo acustico ed il cervello elabora tali informazioni.

Analizziamo di seguito le tre diverse parti che formano l'orecchio:

## Orecchio esterno



*Fig. 3.1 Struttura orecchio esterno*

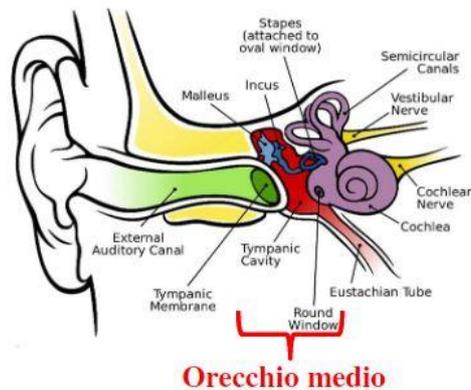
Formato da padiglione auricolare e canale uditivo esterno, la funzione dell'orecchio esterno è quella di raccogliere l'energia sonora e di trasmetterla, attraverso il canale uditivo esterno, fino al timpano. Il canale uditivo esterno produce due vantaggi: in primo luogo, protegge il timpano e l'orecchio medio dai danni; inoltre, permette all'orecchio interno di essere posizionato molto vicino al cervello, riducendo così la lunghezza dei nervi e risultando in un breve tempo di viaggio per i potenziali d'azione nel nervo. Il condotto uditivo esterno esercita una forte influenza sulla risposta in frequenza dell'organo uditivo. Si comporta come un tubo aperto con una lunghezza di circa 2 cm e corrisponde circa ad un quarto della lunghezza d'onda delle frequenze vicine a 4 kHz. Il canale uditivo esterno è responsabile dell'alta sensibilità del nostro organo uditivo in questa gamma di frequenza, indicata dalla caduta della soglia nella quiete intorno a 4

kHz. Questa alta sensibilità, tuttavia, è anche la ragione per l'alta suscettibilità ai danni nella regione intorno ai 4 kHz.

$$\lambda_{risonanza} \simeq 4 \cdot L$$
$$f = \frac{c}{\lambda} \simeq \frac{340 \left[ \frac{m}{s} \right]}{4 \cdot 0.025[m]} \simeq 3400[Hz]$$

Il canale uditivo esterno ha mediamente una lunghezza di 2.5 [cm] ed un diametro di 0.7 [cm]. La sua funzione è di convogliare il suono verso l'orecchio medio e di aumentare la sensazione dei suoni che lo attraversano. Quest'ultimo effetto avviene in seguito alle risonanze tipiche di un condotto chiuso ad una estremità (come le canne di un organo); da quanto visto in precedenza (cfr. Sez. 1a) le frequenze per le quali avviene la risonanza sono strettamente legate alle dimensioni del canale ed alla lunghezza d'onda del fenomeno sonoro. Il primo picco si osserverà per una lunghezza d'onda pari a circa 4 volte la lunghezza del canale auditivo (ca. 3400 [Hz]) con una amplificazione fino a 12 [dB] in corrispondenza delle frequenze attorno ai 4000 Hz, molto importanti per l'ascolto della voce umana.

## Orecchio medio



*Fig. 4.1 Orecchio medio*

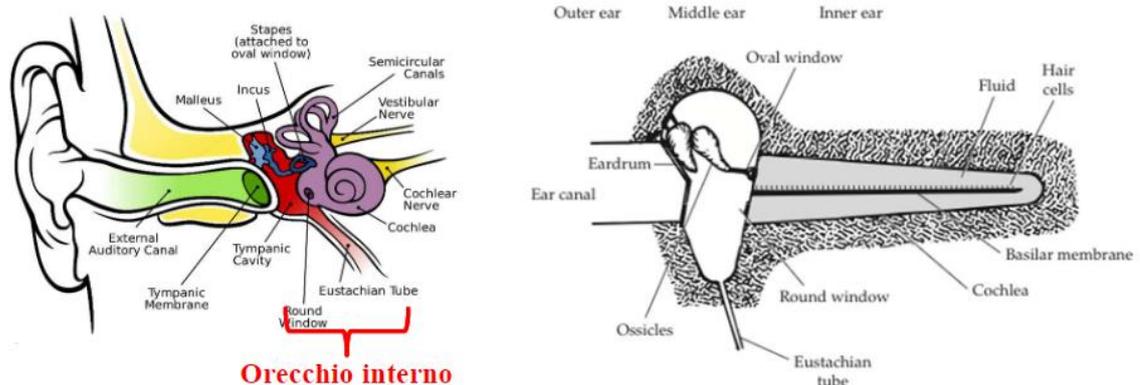
Il suono che colpisce l'orecchio esterno consiste in oscillazioni di particelle d'aria; mentre l'orecchio interno contiene fluidi che circondano le cellule sensoriali ed è quindi necessario produrre oscillazioni in questi fluidi per eccitare queste cellule, e di conseguenza permettere la percezione del suono. Se ipotizzassimo che sia l'aria direttamente a mettere in moto il fluido presente nell'orecchio interno, a causa del pessimo adattamento di impedenza tra i due mezzi, solo un millesimo dell'energia dell'onda sonora verrebbe trasferita al fluido che circonda le cellule sensoriali; mentre il resto dell'energia verrebbe riflessa, rendendo impossibile il poter sentire all'uomo. Proprio per evitare perdite di energia a causa delle riflessioni, nell'orecchio medio viene effettuato un adattamento di impedenza per far corrispondere le impedenze dell'aria e del liquido all'interno dell'orecchio. I movimenti del timpano sono trasmessi alla piastra della staffa attraverso il movimento di tre ossicini chiamati martello, incudine e staffa. La pedana della staffa, insieme a una membrana a forma di anello chiamata finestra ovale, forma l'ingresso all'orecchio interno.

Attraverso i rapporti di leva tra le lunghezze del martello e dell'incudine, che è circa pari a 2, e i rapporti di area tra il timpano e la pedana della staffa, che è circa pari a 15, si ottiene una corrispondenza quasi perfetta tra le impedenze nell'uomo, in particolare nella gamma di frequenza media intorno a 1 kHz. Normalmente, lo spazio dell'orecchio medio con i suoi elementi di trasformazione è chiuso da un lato dal timpano e dall'altro dalla tromba di Eustachio. Tuttavia, la tromba di Eustachio, essendo collegata alla regione superiore della gola, si apre brevemente quando si deglutisce. Perciò, quando

ci si ritrova in condizioni ambientali esterne particolari, come ad esempio durante una arrampicata in montagna, o su un aereo in volo, o durante in immersione subacquea, possiamo ritrovare un aumento o diminuzione estrema della pressione, che va a variare la posizione di riposo del timpano.

Di conseguenza, il punto di lavoro nella caratteristica di trasferimento degli ossicini dell'orecchio medio cambia, producendo una riduzione della sensibilità uditiva. Generalmente l'udito normale viene ripreso con la deglutizione perché durante una breve apertura della tuba di Eustachio, l'aria nell'orecchio medio può essere equalizzata con quella dell'ambiente.

## Orecchio interno



*Fig. 4.1 Orecchio interno*

Nell'orecchio interno, oltre al Vestibolo che si occupa del senso di equilibrio, troviamo la Coclea, che compone la parte finale del nostro apparato uditivo. La forma della Coclea ricorda appunto quella del guscio di una chiocciola, con un canale spirale avvolto intorno ad un nucleo di forma conica. Si divide in tre scale, o rampe: scala vestibolare, scala media e la scala timpanica, divise da varie membrane. La membrana basilare, la quale divide la scala vestibolare e la scala timpanica, termina con una apertura detta elicotrema, che mette in comunicazione le due scale, permettendo al liquido cocleare di passare da una parte all'altra della membrana basilare. Tale membrana entra in oscillazione se sollecitata dall'onda derivata dal liquido cocleare.

Appoggiato sopra la membrana basilare troviamo l'organo del Corti, che è l'organo neuro-sensoriale uditivo responsabile della trasduzione dell'impulso cinetico in elettrochimico. L'organo dei Corti contiene varie cellule di supporto e le importantissime cellule sensoriali, dette cellule cigliate. Le cellule cigliate vengono flesse partecipando del moto oscillatorio della membrana basilare, ed è proprio tale movimento ad indurre le cellule cigliate a generare impulsi elettrici da inviare alle terminazioni nervose che, tramite il nervo uditivo, vengono convogliate al cervello ed elaborate in sensazioni sonore.

## GRANDEZZE ACUSTICHE

### Livelli nel Tempo

Il suono è caratterizzato da onde di pressione che presentano un andamento oscillante, sinusoidale intorno allo zero. Per tale motivo è sensato calcolarne il valore efficace (rms):

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt}$$

Da tale valore è possibile calcolare il livello di pressione sonora (Spl), la cui unità di misura è il dB:

$$Spl = 10 \log_{10} \left( \frac{p_{rms}}{p_0} \right)^2$$

Dove  $p_0$  assume il valore di  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Il valore Spl è una misura istantanea del livello sonoro, se ripetuta più volte darà risultati differenti, se le sorgenti acustiche non sono perfettamente stazionarie. Per superare questo limite è stato introdotto il livello sonoro equivalente  $Leq$ , cioè quell'ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale, genera la medesima quantità di energia sonora nello stesso intervallo temporale. Viene utilizzato in ambito normativo per valutare e limitare l'esposizione giornaliera a fonti di rumore sui posti di lavoro. È possibile caratterizzare con una sola misura un rumore variabile, per un intervallo temporale prefissato.

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)_{rms}^2}{p_0^2} dt \right)$$

Dove T è l'intervallo di tempo in cui è stata eseguita la misura.

Un altro indice, utilizzato per il calcolo degli eventi singoli, è il SEL, simile a Leq ma normalizzato su un tempo pari ad 1 s.

$$SEL = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right)$$

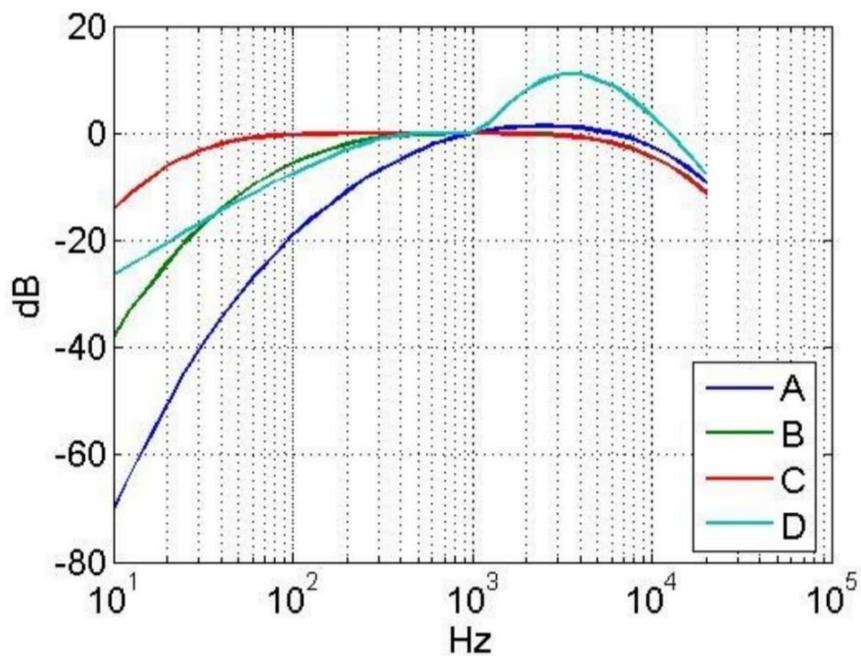
Dove T0 è pari ad 1 s, p(t) è la pressione istantanea e non il valore rms, t2-t1 è il periodo di osservazione in secondi. Il SEL è quel valore costante, mantenuto per 1 s, che garantisce la medesima energia acustica dell'evento misurato. Oltre al livello di pressione, in maniera analoga si possono applicare queste equazioni per valutare i livelli di potenza e intensità acustica.

## Le curve di Ponderazione

Al variare della frequenza, varia la nostra sensibilità. L'essere umano ha sensibilità fra 1 e 4 KHz, ma al di fuori di questo range lo siamo di meno, per arrivare ad essere " sordi " alle frequenze molto basse e molto alte. Ad esempio, sono necessari 79 dB a 100 Hz per darci il medesimo livello acustico fornito da 60 dB a 1 kHz. Esistono differenti curve di ponderazione, infatti il nostro sistema uditivo risponde in maniera differente, oltre che al variare della frequenza, anche al variare del livello acustico e della natura dell'evento.

- La ponderazione A, oggi la comunemente più usata, deriva dalla curva di isofonia 40 phon, ed è utile per rumori con un valore Spl inferiore ai 60 dB.
- La ponderazione B deriva dalla curva isofonica 60 phon, adatta per suoni compresi fra 60 e 80 dB.
- La ponderazione C deriva dalla curva di isofonia 100 phon, utile per rumori molto elevati, superiori agli 80 dB, ha la caratteristica di rimanere piatta per un range di frequenze molto elevato.
- La ponderazione D viene utilizzata per rumori estremamente elevati, generalmente è utilizzata in ambito aeronautico.

(nella figura sono mostrate le curve di ponderazione A, B, C, D)



*Fig. 1.2 Le curve di Ponderazione*

Le curve di ponderazione si utilizzano sottraendo, per ogni intervallo di frequenza, al valore in dB lineari il livello dato della curva. Ad esempio, a 500 Hz la ponderazione A prevede -3.2 dB, quindi a questa frequenza bisogna sottrarre 3.2 dB al livello presente nello spettro del generico suono analizzato. Le curve di ponderazione derivano da quelle di isofonia tramite ribaltamento ed opportuna traslazione; tutte e 4 le curve danno un valore nullo di ponderazione alla frequenza di 1 kHz, dove c'è quindi corrispondenza con i dB lineari.

# GRANDEZZE PSICOACUSTICHE

## Bande critiche

Le bande critiche, la cui unità di misura è il Bark, ricostruiscono la selettività in frequenza del nostro apparato uditivo. Sono state individuate da Fletcher. Vengono individuate 24 bande di Bark, la cui frequenza iniziale va da 0 a 15550 Hz. Per passare dal dominio delle frequenze ai Bark si può utilizzare la seguente equazione:

$$z = 13\arctg(0.76f) + 3.5\arctg\left(\frac{f}{7.5}\right)^2$$

Con  $f$  espressa in kHz.

Uno dei metodi per calcolare la larghezza di una certa banda critica è quello di utilizzare la soglia minima di udibilità in quiete. Ad esempio, poniamoci a 920 Hz, qui la soglia di udibilità è di 3dB, quindi sarà udibile un tono puro con livello di pressione sonora pari a 3dB, oppure due toni puri con livello di pressione sonora di 0dB ciascuno o 4 toni con -3dB Spl. Mantenendo una spaziatura in frequenza costante di 20 Hz, partendo da un tono puro a 920 Hz e 3 dB Spl, si aggiungono ulteriori toni puri, così facendo si è riscontrato che il limite di udibilità può essere raggiunto da 9 toni puri con -6 dB Spl ciascuno, con frequenza compresa fra 920 a 1080 Hz. Aggiungendo ulteriori toni puri a frequenze maggiori, sempre con un livello di pressione sonora pari a -6 dB, non si hanno ulteriori influenze sulla soglia di udibilità. Quindi 9 toni puri equi spazati di 20 Hz, fra 920 e 1080 Hz, ognuno con livello pari a -6 dB vengono percepiti ugualmente a 16 toni puri con medesimo livello e parimente equi spazati fra i 920 e i 1200Hz. Di conseguenza fra i 920 e i 1080 Hz è presente una banda critica, precisamente l'ottava banda di Bark. Con questo procedimento possono essere individuate tutte le rimanenti bande critiche. Fino a 500 Hz le bande critiche hanno ampiezza pari a 100 Hz, oltre hanno larghezza prossima al 20% della frequenza centrale di banda.

## Loudness

è una caratteristica complessa perché dipende sia dal livello di pressione sonora sia dalla frequenza. Nel 1933 Fletcher e Munson condussero, nei laboratori Bell, una sperimentazione tesa a definire la loudness mediante toni puri sinusoidali in regime stazionario. Ne derivò un grafico in cui vengono riportate le curve isofoniche (iso-phon)

legate ai livelli di pressione ed alle frequenze. Oggi le curve isofoniche che vengono adottate fanno riferimento alla UNI ISO 226/2007. Nella figura seguente è riportato l'audiogramma normale di Fletcher e Munson:

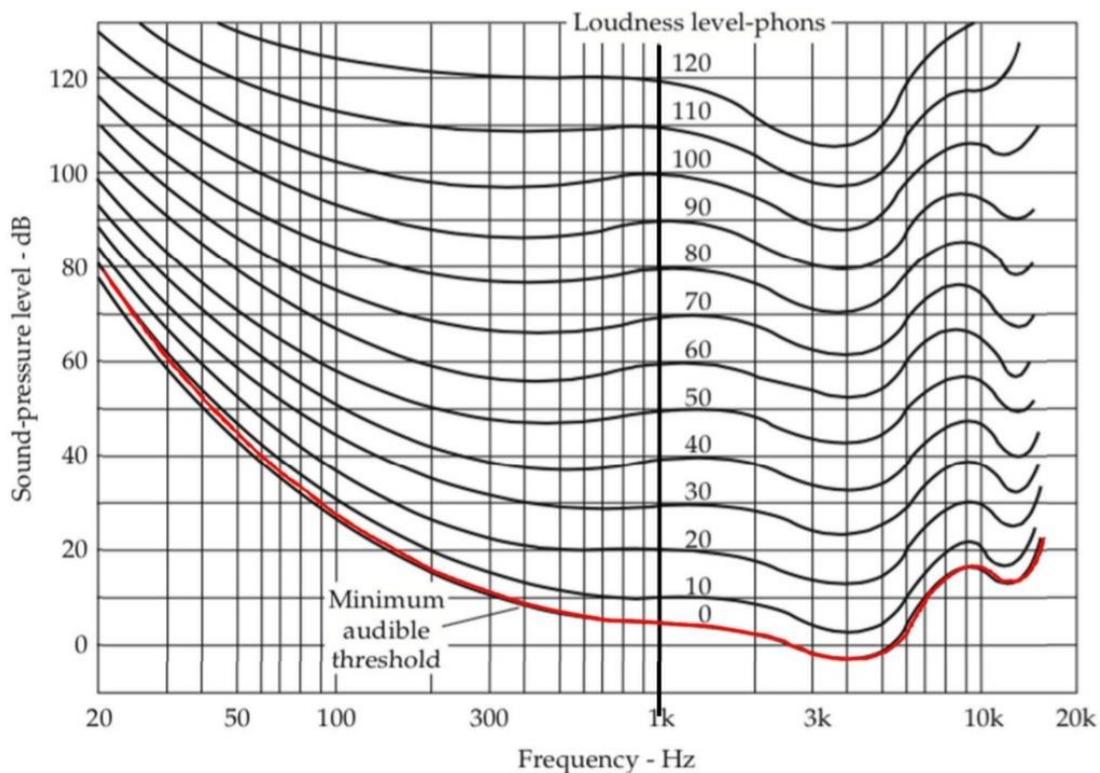


Fig. 2.2 Le isofoniche di Fletcher e Munson

Il livello di loudness stima la rumorosità acustica percepita ed ha come unità di misura il phon, 1 phon corrisponde al livello di pressione sonora di un'onda piana che incide frontalmente, con frequenza 1 kHz, in campo libero. Quindi un tono puro con frequenza 1 kHz e un livello di pressione sonora di 70 dB, avrà un livello di loudness pari a 70 phon. La curva inferiore d'isofonia, quella a 3 phon, corrisponde alla soglia limite di udibilità. Le curve fino a 20 phon tendono ad essere parallele alla curva soglia limite di udibilità, mentre quelle superiori si scostano, decrescendo di meno all'aumentare della frequenza. Di conseguenza alle basse frequenze, a pari aumento di pressione sonora, corrisponde un maggiore aumento del livello di loudness rispetto a quanto accada alle alte frequenze. Inoltre, alle basse frequenze, le curve di isofonia decrescono meno all'aumentare del livello di pressione sonora, infatti, per un tono di 50 Hz, 50 dB corrispondono a circa 20 phon, 110 dB corrispondono a circa 100 phon. Un comportamento simile si ha anche alle alte frequenze, dove però la nostra sensibilità è maggiore, infatti, la differenza fra dB e phon è inferiore rispetto a quella riscontrabile alle basse frequenze. Dalle curve è anche

facilmente osservabile come, a parità di dB, un tono appare tanto più intenso quanto più la sua frequenza è elevata. Se a 50 Hz, 50 dB corrispondono a circa 20 phon, a 10 kHz corrispondono circa a 40 phon.

In campo diffuso il suono ha provenienza omnidirezionale, ma il nostro sistema uditivo non ha la medesima sensibilità nelle diverse direzioni; inoltre la dipendenza dalla direzione è influenzata anche dalla frequenza. Di conseguenza le curve di isofonia in campo diffuso sono differenti da quelle in campo libero. In figura 4.14 è riportata la correzione da applicare a suoni in campo diffuso. La correzione è nulla fino a 200 Hz, arriva a circa -3db a 1kHz, +2 dB a 2.5 kHz e decresce fino a -5 dB a 10 kHz. Questo implica che, a parità di phon generati, un tono con frequenza 1 kHz in campo diffuso, necessita di 3 dB Spl in meno rispetto ad uno in campo libero. Il livello di loudness dipende fortemente anche dalla larghezza di banda del rumore, dal contenuto in frequenza e dalla durata temporale, quindi per toni complessi è sbagliato ricondurre le curve di isofonia ad una pesatura del livello di pressione sonora secondo la scala A, invece può essere accettabile per toni a banda stretta. Nella seguente figura è riportata l'attenuazione in db in campo diffuso al variare della frequenza, per avere pari livello di loudness.

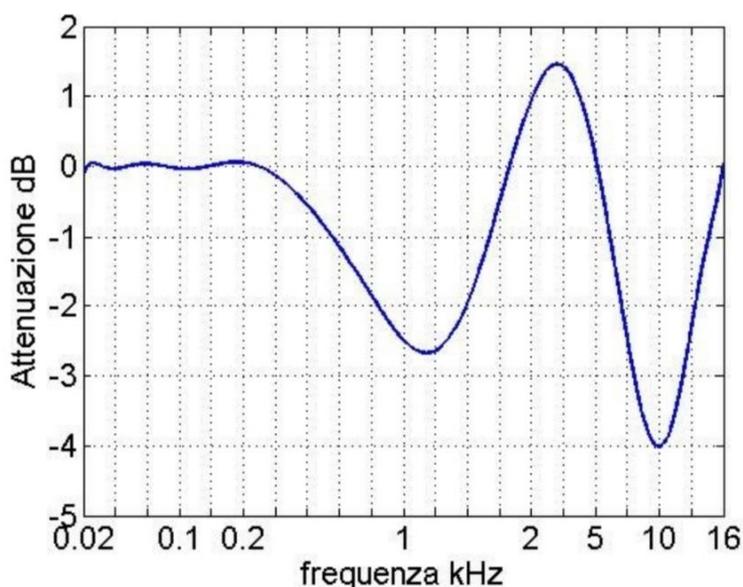


Fig. 3.2 Attenuazione in dB da applicare in campo diffuso

La loudness, a differenza del livello di loudness, è un indice soggettivo per la comparazione dell'intensità sonora di un qualunque rumore, rispetto ad uno di riferimento. La sua unità di misura è il sone, 1 sone equivale all'intensità sonora di un tono con frequenza 1 kHz avente 40 dB Spl, in campo libero. L'andamento della loudness è stato valutato tramite prove di ascolto, il cui scopo era quello di individuare un rapporto deterministico fra l'intensità percepita, utilizzando due toni di pari frequenza, ma con differente livello di pressione sonora. Dai risultati, per un tono con frequenza 1 kHz, è

emerso che per generare una sensazione di raddoppio dell'intensità sonora, è necessario un incremento di 10 dB rispetto al tono di riferimento, se quest'ultimo ha un livello di pressione sonora maggiore di 40 dB, in caso contrario è sufficiente un aumento inferiore. Alla frequenza di 1 kHz servono circa 5 dB di Spl in più per ottenere un raddoppio del livello di intensità acustica se il tono base ha 20 dB, mentre ne servono 10 se quest'ultimo ha 40 o più dB di Spl. Per definizione alla soglia minima di udibilità corrisponde un valore di 0 sone, quindi per una frequenza di 1 kHz, 0 sone corrispondono a 3 dB Spl e di conseguenza a 3 phon.

Per la frequenza di 1kHz si può utilizzare questa equazione approssimata:

$$N \approx 2^{\frac{L-40}{10}}$$

Dove N è il livello di loudness in sone, mentre L è il livello di pressione sonora in dB. L'equazione deriva dalla seguente relazione:

$$N = \frac{1}{16} \left( \frac{I_{1KHZ}}{I_0} \right)^{0.3}$$

Mentre per un suono UEN, cioè in grado di generare un livello di eccitazione, e quindi di loudness, costante su tutte e 24 le bande critiche vale la seguente relazione:

$$N = \frac{2}{3} \left( \frac{I_{UEN}}{I_0} \right)^{0.23}$$

Dove I rappresenta il livello di intensità sonora,  $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$ .

La loudness specifica, indicata con N', rappresenta il valore di loudness calcolato sulle singole bande critiche, la sua unità di misura è sone/Bark. Integrandola su tutte le bande critiche si ricava la loudness complessiva, come mostrato nel seguente integrale:

$$N = \int_0^{24Bark} N' dz$$

La loudness viene calcolata partendo dalla distribuzione delle componenti spettrali sulle bande critiche, dalle quali viene ricavato il livello di eccitazione prodotto, da quest'ultimo si ricava la specific loudness, che una volta integrata, su tutte le bande critiche, dà in uscita il valore di loudness. Il passaggio dal livello di eccitazione, sulla banda critica, alla specific loudness, avviene seguendo la legge di Stevens, la quale afferma che le sensazioni di intensità vengono percepite secondo un elevamento a potenza, che può essere scritto come segue:

$$\frac{\Delta N'}{N' + N'_{gr}} = k \frac{\Delta E}{E + E_{gr}}$$

Dove  $N'$  rappresenta la specific loudness,  $\Delta N'$  il suo incremento, entrambi correlati al livello di eccitazione  $E$  e il suo incremento  $\Delta E$ , tramite la costante  $k$ .  $N'_{gr}$  e  $E_{gr}$  sono i valori di loudness specifica e di eccitazione, prodotti da un tono con un livello di pressione sonora pari alla curva limite di udibilità, sulla medesima banda critica. Il valore  $E_{gr}$  viene calcolato passando per  $E_{TQ}$ , cioè il valore di eccitazione prodotto da un suono il cui spettro è identico alla curva di soglia minima di udibilità;  $s$  è il rapporto fra l'intensità di tale suono e l'intensità del tono che, sulla banda critica di interesse, produce il valore  $E_{gr}$ :

$$E_{gr} = E_{tq}/s$$

Trasformando l'equazione 4.14 in una differenziale, ponendo come condizione a contorno che al valore di  $E=0$  corrisponde  $N'=0$ , si può scrivere:

$$N' = N'_{gr} \left( 1 + \frac{sE}{E_{tQ}} \right)^2 - 1$$

Utilizzando un valore di riferimento per la specific loudness,  $N'_0$ , si può scrivere:

$$N' = N'_0 \left( \frac{E_{tQ}}{sE_0} \right)^k \left[ \left( 1 + \frac{sE}{E_{TQ}} \right)^k - 1 \right]$$

Nell'immagine seguente è rappresentata l'andamento della loudness in funzione della frequenza per orecchio destro e sinistro:

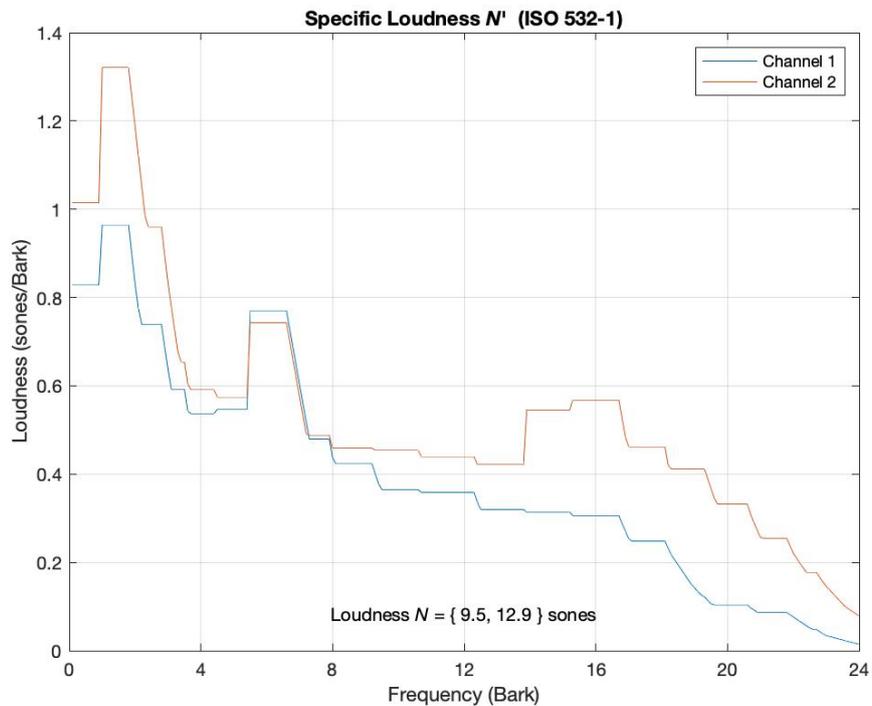


Fig. 4.2 Andamento della Loudness specifica in funzione della frequenza

## Fluctation Strenght

La fluctuation strength si presenta in un suono, sia a banda larga che in un tono puro, quando questo subisce una modulazione in ampiezza, con una frequenza di modulazione inferiore ai 20 Hz. La sua unità di misura è il vacil; 1 vacil è generato da un tono con frequenza 1 kHz avente 60 dB Spl, modulato al 100% in ampiezza, con una frequenza di modulazione pari a 4 Hz.

La fluctuation strength è fortemente influenzata da:

- frequenza di modulazione
- livello di pressione sonora
- ampiezza di modulazione

- frequenza centrale per un tono puro

A parità di altre condizioni, il massimo di fluctuation strength lo si ha per una frequenza di modulazione pari a 4 Hz, corrispondenti a 4 sillabe al secondo, quello che avviene in una normale conversazione. All'aumentare del valore Spl del suono, sia a banda larga, che in presenza di un tono puro, la fluctuation strength cresce. Cresce anche all'aumentare dell'ampiezza di modulazione. Invece al variare della frequenza centrale del tono puro (ovviamente non vale per rumori a banda larga), si ha un massimo intorno ad 1 kHz e decresce allontanandosi. Generalmente la fluctuation strength viene modellata come in figura:

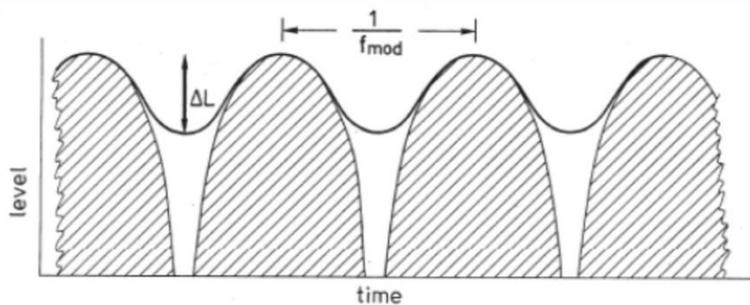


Figura 5.2 Modello per fluctuation strength e roughness

$\Delta L$  rappresenta la profondità di modulazione del modello di mascheramento temporale (linea nera più spessa), di un suono modulato in ampiezza con andamento sinusoidale (area tratteggiata).  $\Delta L$  è quindi la differenza fra il livello massimo e minimo del mascheramento temporale, non va confuso con la profondità della modulazione in ampiezza, che in figura è rappresentata dall'altezza dell'area tratteggiata. La profondità in ampiezza della modulazione è un parametro fisico, al contrario il  $\Delta L$  ne è la quota parte percepibile, dipendente sia dalla frequenza che dalla profondità della modulazione. Una relazione fra la fluctuation strength ( $F$ ),  $\Delta L$  e la frequenza di modulazione è la seguente:

$$F \sim \frac{\Delta L}{\left(\frac{f_{mod}}{4Hz}\right) + \left(\frac{4Hz}{f_{mod}}\right)}$$

Questa relazione può anche essere espressa come integrale sulle bande critiche, questo permette di controllare la variazione del  $\Delta L$  con la frequenza, soprattutto in presenza di toni puri, e la sua dipendenza per modulazioni in frequenza:

$$F = \frac{0.08 \int_0^{24Bark} \left( \frac{\Delta L}{dB Bark} \right) dz}{\left( \frac{f_{mod}}{4Hz} \right) + \left( \frac{4Hz}{f_{mod}} \right)}$$

Esprimendo invece il  $\Delta L$  come rapporto fra loudness specifica massima e minima del mascheramento temporale, cioè  $4\log(N'_{MAX}/N'_{MIN})$  si può scrivere:

$$F = 0.032 \frac{\int_0^{24Bark} \text{Log}_{10} \frac{N'_{max}}{N'_{min}} \frac{dz}{Bark}}{\frac{T}{0.25s} + \frac{0.25s}{T}}$$

Nella figura sottostante viene rappresentato l'andamento della fluctuation strength per orecchio destro e sinistro:

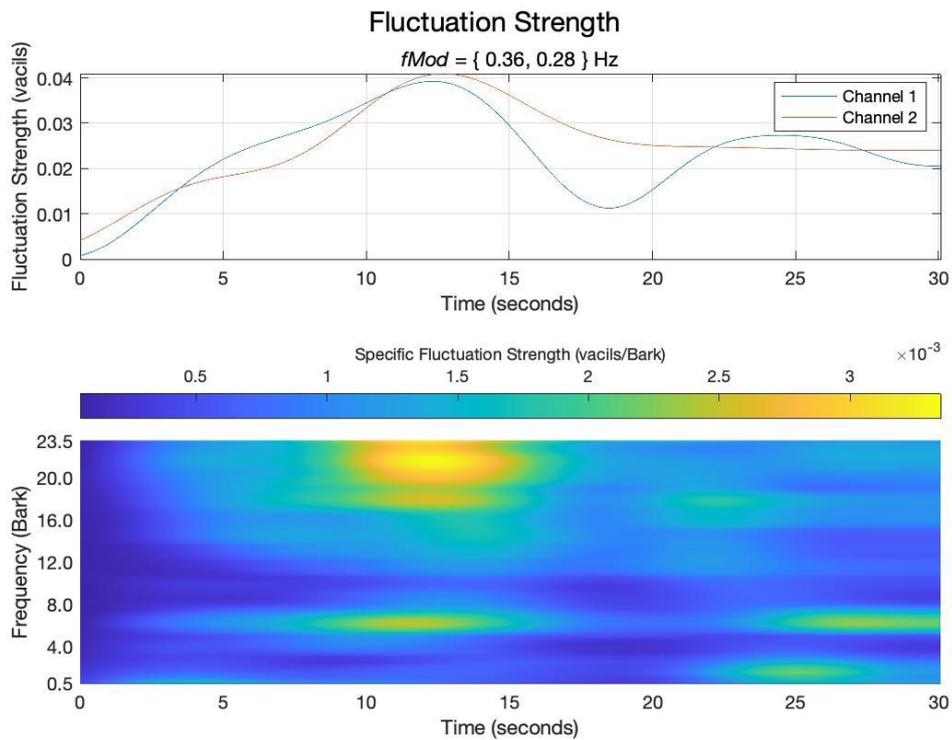


Fig. 6.2 Andamento della fluctuation strength per orecchio destro e sinistro

## Roughness

La roughness è una sensazione percepibile alla presenza di modulazione in ampiezza e in frequenza di un suono, sia a banda larga, sia a banda stretta, ma con frequenze di modulazione più elevate. Generalmente è presente roughness quando la frequenza di modulazione in ampiezza è nel range compreso fra i 15 e i 300 Hz, con un picco intorno ai 70 Hz. La sua unità di misura è l'asper, 1 asper è generato da un tono di frequenza 1 kHz con livello Spl pari a 60 dB, modulato al 100% in ampiezza, con una frequenza di modulazione pari a 70 Hz.

La roughness, per suoni modulati in ampiezza dipende da:

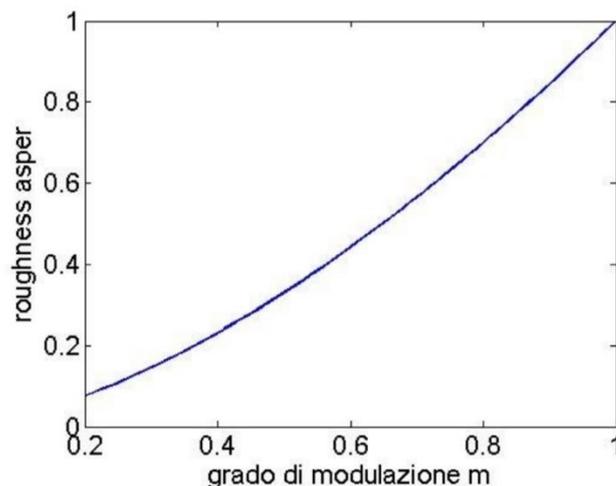
- frequenza di modulazione
- grado di modulazione

La roughness, per suoni modulati in frequenza dipende da:

- frequenza di modulazione del tono puro

All'aumentare del grado di modulazione in ampiezza, aumenta il valore in asper della roughness, il legame è esponenziale con potenza pari a 1.6 per un tono puro, mentre per rumori a banda larga l'esponente decresce fino a 1.3.

Nella figura viene riportato l'andamento della roughness con il grado di modulazione:



*Fig. 7.2 Andamento della roughness con il grado di modulazione, valori in %, per un tono di 1kHz con 60 dB Spl e frequenza di modulazione pari a 70 Hz*

Gradi di modulazione in ampiezza inferiori al 20-25%, non danno origine a roughness, o comunque ne generano valori molto bassi tali da poter essere trascurati. Variando sia la frequenza di modulazione in ampiezza che la frequenza centrale del tono puro, modulando al 100% in ampiezza, si nota che al crescere della frequenza centrale del tono, aumentano sia il massimo valore di roughness raggiungibile, che la frequenza di modulazione per la quale si ha il valore massimo in asper; questo vale per frequenze centrali del tono inferiori a 1 kHz, qui la frequenza di modulazione per la quale si ha il massimo valore in asper è pari 70 Hz, quando per un tono di 250 Hz è pari a circa 50 Hz. Per toni con frequenza superiore ad 1 kHz, il massimo valore di roughness ottenibile decresce all'aumentare della frequenza del tono, il suo valore massimo lo si ottiene per frequenze di modulazione pari a 70 Hz. Questo comportamento, variabile con la frequenza del tono, è spiegabile con l'andamento delle bande critiche in funzione della frequenza, per le basse frequenze, con la risoluzione temporale del nostro sistema uditivo per le alte frequenze. Poniamoci a 250Hz, qui la larghezza di banda critica è pari a 100 Hz, raggiungibile con una modulazione in frequenza di 50 Hz partendo dalla frequenza centrale di banda (250 Hz appunto), spingendosi oltre si sfora nelle bande critiche vicine, andando a ridurre la sensazione di roughness. Alle alte frequenze, le larghezze di banda sono maggiori, conseguentemente prima di sfiorare nelle bande critiche vicine si ha una riduzione di roughness per un eccessivo aumento della frequenza di modulazione. Alle alte frequenze, la diminuzione di roughness è anche provocata dalla risoluzione temporale insufficiente del nostro sistema uditivo, che non permette di riconoscere correttamente la modulazione in ampiezza fisicamente presente. La roughness ha una scarsa dipendenza con il livello di pressione sonora, in genere per toni puri si ha un raddoppio del valore in asper per un aumento di 40- 50 dB di Spl. La roughness può essere modellata similmente alla fluctuation strength, poiché dipende, sia dalla frequenza di modulazione, che dalla profondità del modello di mascheramento temporale ( $\Delta L$ ); si può quindi scrivere la seguente approssimazione:

$$R \sim f_{mod} * \Delta L$$

Nel seguente grafico è riportata la variazione della roughness al variare della frequenza di modulazione in ampiezza e della frequenza centrale del tono, con modulazione al 100%, livello spl costante pari a 60 db:

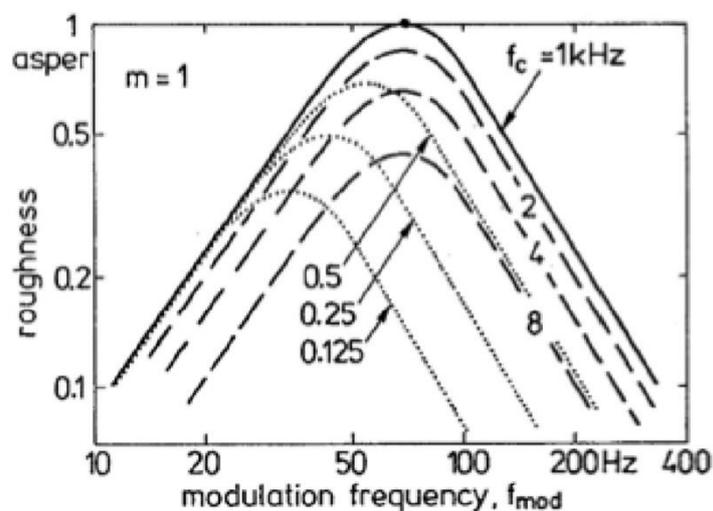


Fig. 8.2 Variazione della roughness al variare della frequenza di modulazione in ampiezza e della frequenza centrale del tono, con modulazione al 100%, livello spl costante pari a 60 dB

Alle basse frequenze di modulazione in ampiezza, il prodotto tenderà a rimanere basso, stesso comportamento si avrà alle alte frequenze di modulazione, poiché, per la risoluzione temporale del nostro sistema uditivo, il  $\Delta L$  rimarrà contenuto, mentre si ha un massimo per valori della frequenza di modulazione in ampiezza pari a 70 Hz. Considerando che  $\Delta L$  varia al variare delle bande critiche, un modello più accurato prevede l'integrazione di tale valore sulle bande di Bark:

$$R = 0.3 \frac{f_{mod}}{\text{kHz}} \int_0^{24\text{Bark}} \frac{\Delta L(z) dz}{\text{dB/Bark}}$$

## Sharpness

La sharpness è una sensazione associabile alla tonalità di colore presente nello spettro acustico, un valore corretto ne accentua la piacevolezza, un valore troppo alto rende il suono aggressivo. Dipende principalmente dalla distribuzione, nello spettro acustico, del livello di pressione sonora e quindi di loudness. Può essere pensata come un indice dello sbilanciamento verso le alte frequenze dello spettro acustico. La sua unità di misura è l'acum, 1 acum viene prodotto da un rumore a banda stretta con una frequenza centrale pari a 1 kHz, avente 60 dB Spl. La dipendenza rispetto al livello di pressione sonora è scarsa, infatti, passando da 30 a 90 dB, a parità di altri fattori, la sharpness raddoppia. Per toni puri, la sharpness varia al variare della frequenza centrale del tono. 60 dB Spl con frequenza centrale 1 kHz generano 1 acum, se la frequenza centrale scende a 250 Hz, si hanno solamente 0.25 acum. A parità di altri fattori, la crescita del livello di sharpness è lineare con la frequenza fino a 16 Bark, circa 3 kHz, oltre tale frequenza la crescita diventa esponenziale. Generalmente al crescere del livello di sharpness aumenta la sgradevolezza del suono.

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24Bark} N' g(z) z dz}{\int_0^{24Bark} N' dz}$$

Il denominatore è l'integrale della loudness specifica  $N'$ , quindi rappresenta la loudness totale, mentre il numeratore è l'integrale della loudness specifica moltiplicata per il numero della banda di Bark ( $z$ ), opportunamente pesata per la funzione  $g(z)$ , che varia al variare della banda critica di interesse. Osservando l'andamento del peso  $g(z)$  in funzione delle bande critiche, risulta evidente il marcato incremento di sharpness all'aumentare dello sbilanciamento dello spettro verso le alte frequenze. La curva  $g(z)$  è stata costruita secondo la seguente approssimazione:

$$g(z) = 0.00012Z^4 - 0.0056Z^2 + 0.1Z^2 - 0.81Z + 3.51$$

$$\text{Con } Z \geq 14$$

$$\text{Altrimenti } g(z) = 1$$

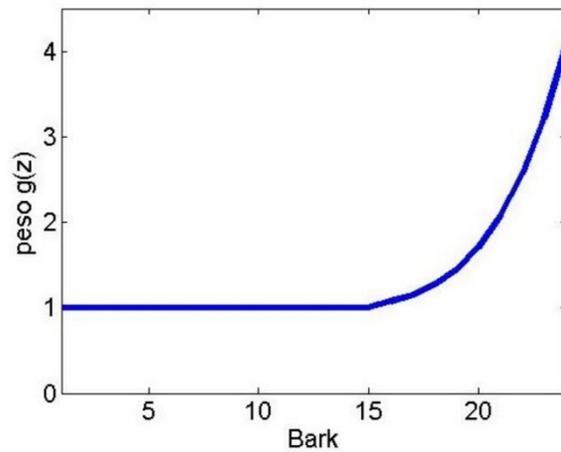


Fig. 9.2 Andamento del peso  $g(z)$  al variare del numero di Bark

Un classico esempio di suono con discreti valori di sharpness è quello emesso da grilli e cicale durante i loro canti. Nel seguente grafico è riportato l'andamento della sharpness per orecchio destro e orecchio sinistro:

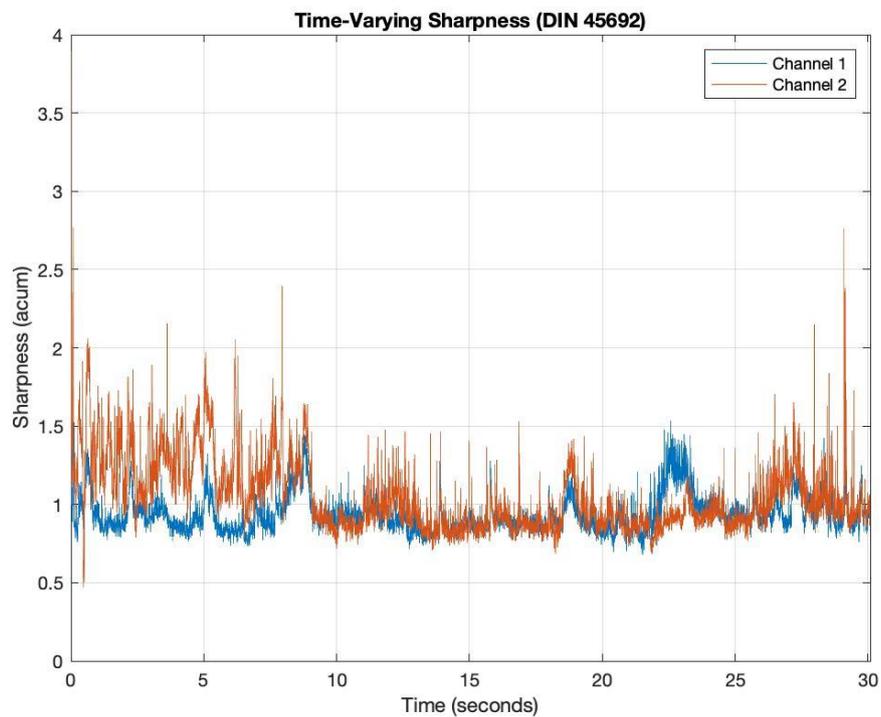


Fig. 10.2 Andamento della sharpness per orecchio destro e sinistro

## Tonality

La tonality è un indicatore della presenza di componenti tonali, il cui livello spicca rispetto al livello medio delle frequenze di banda “vicine”. La sua unità di misura è il tu (tonality unit), 1 tu è generato da un tono puro di frequenza 1 kHz, avente 60 dB Spl.

Il livello complessivo di tonality è influenzato da:

- frequenza dei toni puri
- distanza reciproca nello spettro
- livello di depressione sonora rispetto al valore medio di banda

Il primo passo per il calcolo della tonality consiste nell'estrazione dei picchi tonali, confrontando i singoli campioni con i vicini. Se un generico campione  $S_i$ , oltre ad avere un livello Spl maggiore dei campioni  $S_{i\pm 1}$ , è anche maggiore di  $S_{i\pm 2}$  e  $S_{i\pm 3}$  di almeno 7 dB, tutto il gruppo di 7 campioni, da  $S_{i-3}$  a  $S_{i+3}$ , viene rimosso dallo spettro, trattato come un gruppo di toni puri ed utilizzato per il calcolo di altri parametri del modello. La tonality assume la seguente espressione:

$$T = C w_N^{0.79} \sqrt{\sum_{i=0}^{M-l} [w_1(\Delta Z_j) w_2(f_i) w_3(L_{\Delta,i})]^2}$$

Dove :

$$w_1(\Delta Z_i) = \left( \frac{0.13}{\frac{\Delta Z}{\text{Bark}} + 0.13} \right)^{\frac{1}{0.29}}$$

$$w_2(f_i) = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.2 \left( \frac{f_i}{0.7 \text{kHz}} + \frac{0.7 \text{kHz}}{f_i} \right)^2}}$$

$$w_3(L_{\Delta,i}) = 1 - e^{-\frac{L_{\Delta,i}}{15 \text{dB}}}$$

$$w_N = 1 - \frac{N_N}{N}$$

$L_{\Delta,i}$  rappresenta il livello delle componenti tonali estratte dallo spettro meno

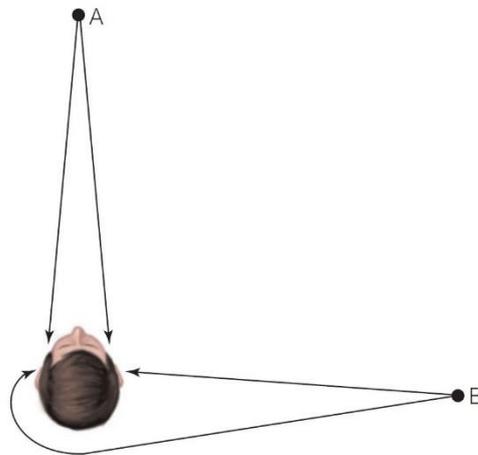
- valore della soglia minima di udibilità
- valore spl della banda critica dopo la rimozione dello spettro

$N$  rappresenta la loudness originale, mentre  $N_N$  la loudness dopo la rimozione delle componenti tonali dallo spettro.

## ASCOLTO BINAURALE E PERCEZIONE SONORA

Simile alla stereoscopia, la stereofonia si basa sulla combinazione di informazioni nel cervello provenienti dalle due orecchie, creando una solida illusione che conferisce allo stimolo un carattere speciale di prospettiva noto come profondità e localizzazione tridimensionale.

Sia nella modalità visiva che uditiva, questa caratteristica permette di separare e identificare le singole sorgenti sonore in maniera più rapida ed efficace di quanto sarebbe accaduto se fosse stato disponibile un solo ricevitore.



*Fig. 1.3 Percezione binaurale*

Ad esempio, il suono proveniente da una sorgente sul lato destro di un soggetto raggiunge l'orecchio sinistro più tardi dell'orecchio destro, poiché deve viaggiare più lontano, e lo raggiunge con un'intensità inferiore, poiché ha sperimentato l'effetto ombra della testa. Più a destra si trova la sorgente, maggiori sono le differenze interaurali.

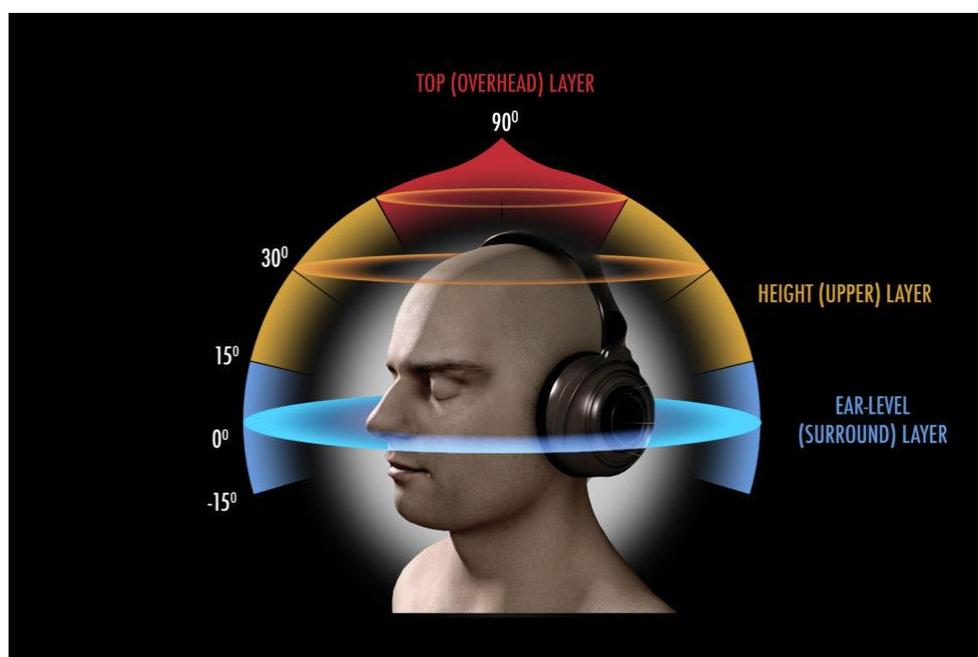
Se le due orecchie elaborano il suono in modo tale che le differenze interaurali siano codificate accuratamente nelle raffiche di potenziali d'azione del nervo uditivo in risposta al suono, due compiti complementari sono lasciati al cervello: rilevare quei particolari modelli di potenziali d'azione dal lato destro e il lato sinistro sono talmente correlati che possono essere attribuiti a un unico oggetto definito, e dalle asimmetrie tra i due input correlati, per localizzare questo oggetto in una qualche direzione orizzontale.

È interessante sottolineare che, in un soggetto con udito normale, quando si passa dall'ascoltare un suono utilizzando un singolo orecchio, e poi utilizzando entrambe le orecchie, abbiamo un incremento dell'intensità percepita.

Per i suoni di almeno 30 dB al di sopra della loro soglia di udibilità, subisce un duplice aumento. Per ottenere lo stesso aumento del volume con un solo orecchio sarebbe necessario aumentare il livello del suono di circa 10 dB. Questo incremento diminuisce a 3 dB per i suoni deboli.

Non solo i segnali suonano più forti quando i soggetti ascoltano con entrambe le orecchie che con un orecchio, ma il trattamento delle informazioni è più sensibile alle piccole differenze, che quando si verificano unilateralmente sarebbe più difficile separare dagli eventi casuali.

Si osserva inoltre che in caso di ascolto binaurale, i suoni possono presentare una intensità superiore rispetto a una presentazione monofonica senza causare disagio.



*Fig.2.3 Differenza percettiva in base ai gradi*

In laboratorio viene utilizzata una “testa” che simula il comportamento umano di quella che è la percezione dei suoni da parte del nostro apparato uditivo; La testa, ai lati della quale sono poste alla stessa altezza le due orecchie, costituisce il primo ostacolo alla libera propagazione del suono



*Fig. 3.3 manichino da laboratorio*

## **La localizzazione spaziale**

La localizzazione è una sfida speciale per il sistema uditivo. Nel sistema visivo e somato-sensoriale, la posizione dello stimolo è mappata direttamente sulle superfici sensoriali, cioè rispettivamente, la retina e la pelle. Per quanto riguarda l'udito invece, è la frequenza, e non la posizione, che viene mappata sulla superficie sensoriale della coclea.

Il nostro sistema percettivo deve confrontare le caratteristiche fisiche del suono che perviene alle due orecchie e di ricavare, da tale confronto, informazioni sulla posizione della sorgente che l'ha generato.

La nostra testa introduce infatti due effetti principali : ITD e ILD.

Andiamo ad esplicitare il primo:

### **ITD**

ITD (Interaural Time Difference): indica la differenza dei tempi di arrivo del suono tra un orecchio e l'altro. Il nostro sistema percettivo è, in condizioni ottimali, capace di cogliere ITD dell'ordine 0,1 milionesimi di secondo e quindi è in grado di valutare i tempi di ritardo che si presentano nelle situazioni tipiche.

Ruotando la testa si può fare in modo che l'ITD si annulli (o comunque scenda al di sotto del minimo valore rilevabile): in questo modo la retta che indica la direzione della sorgente giace in un piano perpendicolare al segmento che unisce le due orecchie e passante per il punto di medio di questo.

Per lo studio della ITD vengono fatte due ipotesi semplificative;

1) la sorgente viene posta distante dalle orecchie che ricevono il suono, così che le onde che raggiungono la testa possano essere considerate piane;

2) testa viene approssimata ad una sfera e i canali uditivi sono posti in punti diametralmente opposti della sua superficie

Queste assunzioni facilitano la descrizione geometrica della distanza extra  $\Delta x$  tra la sorgente e l'orecchio più distante

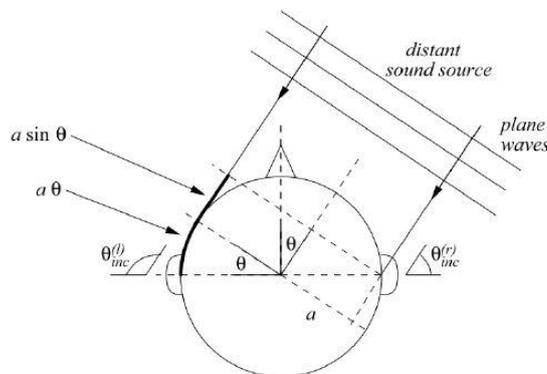


Fig. 4.3 Stima dell'ITD in caso di sorgente a onde piane distanti e testa sferica

Definiti  $\alpha$  il raggio della testa,  $c$  la velocità del suono ( $\sim 343$  m/s),  $\theta$  l'angolo azimutale che definisce la direzione dell'onda incidente sul piano orizzontale, si ottiene la formula semplice ma accurata per l'ITD:

$$ITD \sim \sin \frac{\alpha}{c} (\theta + \sin \theta)$$

da cui è evidente che l'ITD è zero quando la sorgente è posta sul piano mediano ( $\theta = 0$ ) ed è invece massima se essa è posta ad un angolo  $\theta = \pm \pi/2$ , ovvero in corrispondenza di un orecchio.

Poiché la correlazione è debole, è lecito ammettere che l'ITD è indipendente dal parametro di frequenza dell'onda sonora.

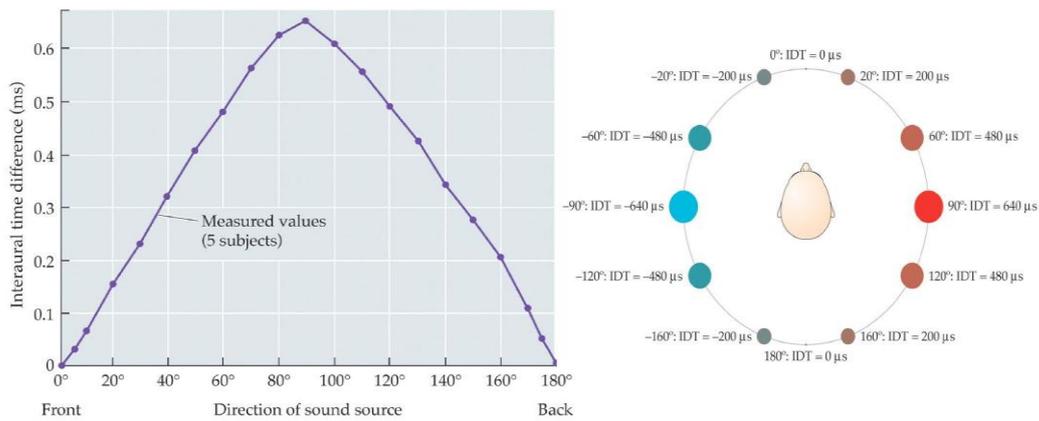


Fig. 5.3 Valutazione dell'ITD in base ai gradi di angolazione

## ILD

Il secondo parametro come accennato prima, è l'ILD :

Interaural Level Difference : indica la differenza tra i livelli di intensità percepiti dalle due orecchie. Il più piccolo valore di IID che il nostro sistema uditivo può apprezzare è dell'ordine di 1 dB.

È interessante notare come l'utilizzo dell'ITD sia molto efficace nel caso di onde a bassa frequenza, con quindi elevata lunghezza d'onda, per le quali l'ostacolo rappresentato dalla testa è trascurabile, mentre nel caso di onde ad alta frequenza, per le quali la testa dell'ascoltatore diventa un ostacolo insormontabile, sia molto più efficace l'utilizzo della ILD.

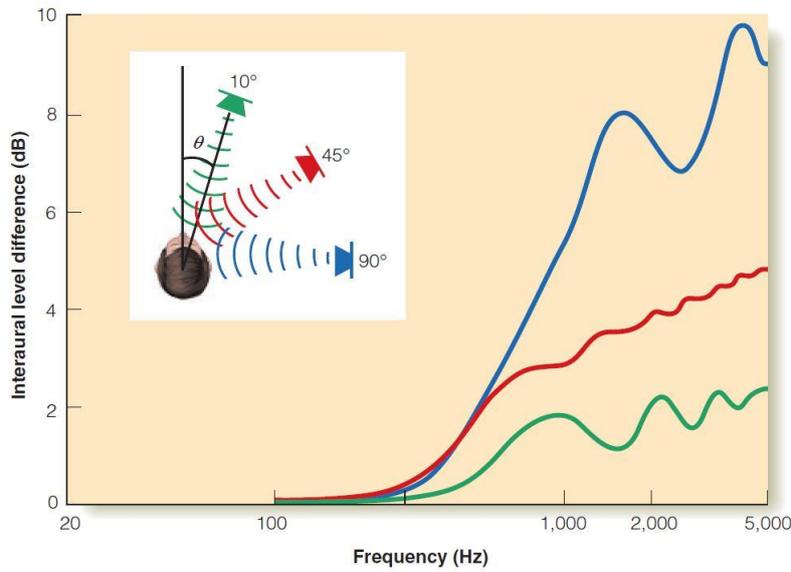


Fig. 6.3 Differenze della percezione in base agli angoli di posizionamento della sorgente

Al contrario dell'ITD, l'ILD è fortemente dipendente dal parametro di frequenza: a basse frequenze, ovvero per lunghezze d'onda confrontabili col diametro della testa ( $\lambda \sim 2a$ ), non si nota quasi alcuna differenza tra la pressione sonora alle due orecchie, che diviene invece significativa alle alte frequenze.

Considerando le stesse ipotesi semplificative menzionate in precedenza, la funzione di trasferimento di una testa sferica ideale di raggio  $a$ , alla cui distanza  $r$  è posta una sorgente sonora puntiforme (con  $r > a$ ), risulta :

$$H_{sphere}(\rho, \mu, \theta_{inc}) = -\frac{\rho}{\mu} e^{i\mu\rho} \sum_{m=0}^{+\infty} (2m+1) P_m(\cos \theta_{inc}) \frac{h_m(\mu\rho)}{h'_m(\mu)}$$

Dove  $\theta_{inc}$  è l'angolo di incidenza dell'onda sonora sulla testa,  $\mu = \omega a/c$  la frequenza normalizzata  $\rho = r/a$  la distanza normalizzata,  $P_m$  e  $h_m$  sono rispettivamente il polinomio di Legendre e la funzione sferica di Hankel di ordine  $m$ -simo.

Tale formula, che rappresenta la diffrazione di un'onda acustica su una sfera vista da un determinato punto sulla sfera stessa, è dipendente dalla frequenza. In particolare, per basse frequenze, essa non è direzionalmente dipendente e la sua ampiezza  $|H_{sphere}|$  è identicamente unitaria  $\forall \theta_{inc}$ . Per alte frequenze (ovvero con  $\mu > 1$ ), la dipendenza da  $\theta_{inc}$  diventa evidente: nel caso di incidenza normale ( $\theta_{inc}=0$ ) si misura un guadagno di 6 dB, consistente al caso di un'onda piana che incide perpendicolarmente una superficie

rigida. All'aumentare di  $\theta_{inc}$  tale guadagno diminuisce, fino ad annullarsi intorno a  $\theta_{inc} = 170^\circ$  ( e non a  $\theta_{inc} = \pi$  come ci aspetterebbe, a causa del cosiddetto effetto *bright spot*, dovuta alla somma costruttiva delle onde propagate attorno alla sfera).

La misura dell'ITD e dell'ILD, a meno che la sorgente sonora non sia molto vicina alla testa, non permette di localizzare la distanza della sorgente ma solo la direzione di provenienza del suono. In ambienti chiusi esso è in grado di valutare e dividere la quantità dell'energia arriva direttamente dalla sorgente e quanta da fenomeni di riflessione con le pareti: dalla proporzione di questi due contributi il sistema uditivo è in grado di stimare la distanza della sorgente.

In ambienti aperti, con una sorgente sonora lontana, valutando, per esperienza dell'ascoltatore, le modifiche del timbro del suono al variare della distanza.

### **Internalizzazione ed esternalizzazione**

Quando si analizza la posizione percepita di un suono riprodotto in stereo tramite delle cuffie, si può incorrere nel fenomeno di internalizzazione: la sensazione è che la sorgente si trovi all'interno della testa e che si sposti lungo l'asse interaurale (asse x), sembrando più vicina ad un orecchio oppure all'altro (lateralizzazione).

In particolare, la sorgente verrà percepita come al centro della testa se vengono emessi due identici suoni monoaurali da entrambe le cuffie. Il suono viene invece percepito lateralizzato se si mutano i parametri di ITD ed ILD fino ad avere l'impressione che la sorgente si trovi in prossimità di un orecchio, sempre dentro la testa.

Tale effetto è denominato IHL (inside-the-head localization).

Rimuovendo l'effetto IHL, si riesce a far percepire la sorgente come esterna all'ascoltatore (esternalizzazione) e il processo di individuazione della posizione è detto localizzazione. Si è notato che l'aggiunta di un riverbero, sia esso naturale o artificiale, migliora decisamente l'esternalizzazione.

## Percezione azimutale

Gli effetti prodotti dalla presenza della testa nello spazio, ovvero l'ITD e l'ILD, sono i principali responsabili della percezione sul piano orizzontale.

Per studiare questi fenomeni, la Teoria Duplex divide lo spettro delle frequenze in intervalli, rendendo complementari i contributi di ITD ed ILD:

- per frequenze  $< 800$  Hz, si considerano solamente gli effetti temporali interaurali (ITD), dal momento che la funzione di trasferimento dell'ILD diventa piatta.

In questo intervallo, che corrisponde alla relazione  $\lambda/2 > 2a$  (con  $\lambda$  = lunghezza dell'onda sonora,  $a$  = raggio della testa), il sistema uditivo è in grado di determinare il ritardo di fase tra le due orecchie senza ambiguità

Per frequenze inferiori agli 80 Hz circa, tuttavia, non si è più in grado di ricostruire l'informazione azimutale, risultando inutile anche il contributo dell'ITD.

- per frequenze  $\omega > 1600$  Hz, prevalgono le differenze di livello interaurale (ILD): non si è più in grado, infatti, di rilevare quale sia il fronte d'onda principale dai suoi tempi di ritardo.

Esiste tuttavia, se l'involuppo dell'onda non ha ancora una frequenza troppo elevata, una stima dell'ITD come misura dello sfasamento tra l'involuppo delle due onde: in questo caso si parla più opportunamente di Interaural Envelope Difference (IED).

Si introduce qui, infine, un nuovo fenomeno percettivo basato sulla capacità del sistema uditivo di estrarre l'informazione azimutale nell'intervallo di tempo che trascorre tra l'arrivo dell'onda diretta e quello delle onde riflesse. Tale effetto "di precedenza" è particolarmente presente in ambienti molto riverberanti.

- le frequenze intermedie costituiscono una zona di transizione, dove si osservano contributi da entrambi i fenomeni.

## Teoria duplex

La Teoria Duplex è formalizzata per ambienti anecoici, ovvero privi di eco. Questo, in aggiunta alle ipotesi semplificative sulla testa (la testa umana non è in realtà perfettamente sferica, esistono asimmetrie e componenti facciali aggiuntivi, le orecchie

non giacciono esattamente sull'asse  $x$ ), non permette di descrivere esattamente la situazione reale.

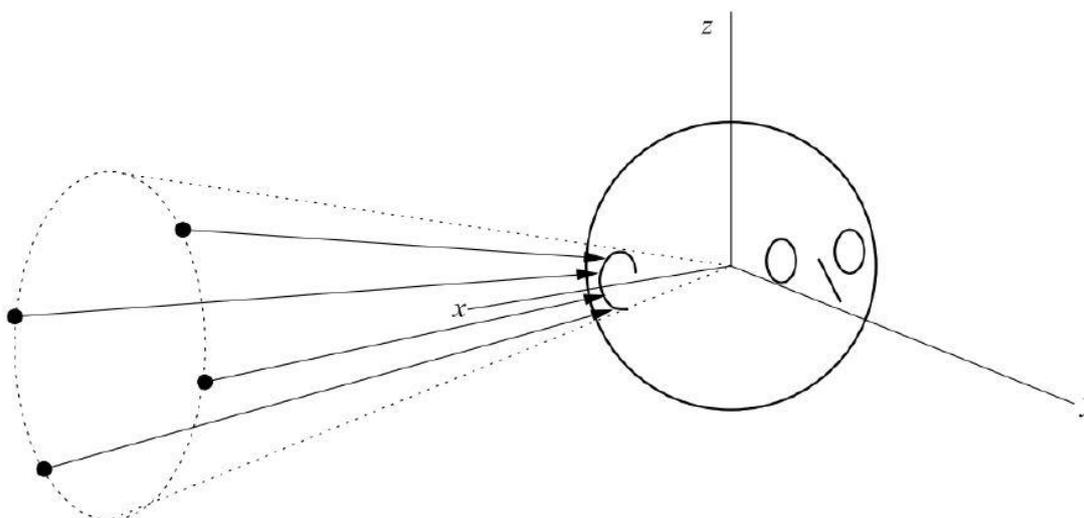
Ciò che si ottiene è, tuttavia, una buona approssimazione. Pur non godendo della situazione ideale, infatti, si osserva che i valori di ITD ed ILD per coppie di sorgenti poste rispettivamente a  $+\theta$  e  $-\theta$  sono pressoché identici. Tale fenomeno è significativo e causa, nell'ascoltatore, la cosiddetta "front/back confusion" portando ad una totale inversione della percezione azimutale.

### Percezione dell'elevazione

La definizione dell'elevazione di una sorgente rispetto al piano orizzontale risulta più difficile, se confrontata con la percezione azimutale.

Una sorgente sonora posta in qualsiasi punto di una superficie conica avente per vertice l'orecchio di una testa sferica produce, infatti, identici valori di ITD ed ILD. Tale superficie, detta cono di confusione, estende il fenomeno di front/back confusion descritto sopra.

La pinna, grazie alle pieghe tipiche della sua conformazione, è fondamentale per migliorare la localizzazione verticale, producendo picchi e tagliando bande di frequenza diversi a seconda della posizione della sorgente.



*Fig. 7.3 Percezione sull'asse  $x,y,z$*

Si osserva che, semplicemente ripiegando od occludendo i padiglioni, è molto più difficile stabilire l'altezza da cui proviene il suono.

## Percezione della distanza

Ancor più complicata è l'esatta localizzazione della sorgente dal punto di vista della distanza. In tale processo, infatti, intervengono molti fattori ed il contributo di alcuni di essi può venir annullato dalla somma di altri.

Esaminiamone di seguito i principali:

- esiste innanzitutto un'ovvia correlazione tra la distanza e l'intensità. In condizioni prive di eco, il guadagno di intensità sonora  $g$  è inversamente proporzionale alla distanza relativa  $d$  sorgente-ricevitore:

$$g = \frac{1}{d^2}$$

e, per una sorgente omnidirezionale, il guadagno diminuisce di circa 6dB al raddoppiare della distanza.

Si definisce loudness l'intensità percepita dal sistema uditivo, che segue pertanto una scala diversa dall'intensità stessa.

- la familiarità dell'ascoltatore col suono percepito contribuisce a costruirne l'immagine spaziale. Infatti, se la sorgente che emette quel determinato suono è abitualmente associata ad una certa distanza nota al ricevente, sarà più facile localizzarla.
- nel caso in cui il suono sia arricchito da riverbero, il rapporto di proporzionalità inversa sorgente-ricevitore visto per l'onda diretta non si applica alle onde riflesse, rendendo impossibile basarsi unicamente su di esso per distinguere la distanza relativa di due sorgenti.

Si introduce il rapporto tra energia riflessa ed energia diretta (R/D ratio), che sembra invece contribuire nel fornire una diversa impressione tra due sorgenti a differenti distanze dall'ascoltatore.

Si osserva inoltre che, in totale mancanza di riverbero, si è portati a sottostimare la distanza apparente della sorgente

- esistono inoltre determinati effetti spettrali, su cui ci si basa per definire la distanza della sorgente. Nel campo vicino (ovvero per distanze intorno ad 1.5 m dall'ascoltatore), ad esempio, a mano a mano che la sorgente si avvicina, il suono si arricchisce alle basse frequenze, creando la sensazione di un tono più scuro.

Vanno inoltre considerate, seppur più deboli, le condizioni atmosferiche ed il coefficiente di assorbimento dell'aria, che a loro volta influenzano la percezione della distanza.

- sembra esistere inoltre una qualche correlazione tra l'azimut a cui è posta la sorgente e la capacità del ricevitore umano di poterne ricostruire la distanza: esperimenti dimostrerebbero, infatti, che è più facile riconoscere la distanza di un suono proveniente da una sorgente laterale ( $\theta \sim \pm \pi/2$ ), piuttosto che da una posta sul piano mediano (auditory parallax). La questione è tuttavia ancora in fase di studio.

| SCALA DEI TEMPI (s)            | LUOGO DI ELABORAZIONE                         | SENSAZIONE   | INFLUENZA (Cultura, Ambiente, Stato) |
|--------------------------------|---|--|--------------------------------------|
| $6 * 10^{-5} \div 6 * 10^{-2}$ | orecchio interno                              | altezza, intensità, timbro   | debole                               |
| $\sim 0.1$                     | collegamento nervoso tra orecchio e corteccia | transitori, timbro, direzionalità, identificazione, discriminazione  |                                      |
| $> 0.1$                        | corteccia cerebrale                           | ritmo, messaggio musicale  |                                      |
|                                | emisfero sinistro                             | breve termine (sequenzializzazione, parlato)                         |                                      |
|                                | emisfero destro                               | lungo termine (integrazione spaziale (visiva) e temporale (uditiva)) | forte                                |

*Fig. 8.3 Scala dei tempi e luogo di elaborazione per le sensazioni*

## Pitch Perception

Per pitch si intende l'altezza tonale, cioè quella qualità del suono che permette di distinguere se è acuto o grave e dipende dalla frequenza dell'onda sonora che lo ha generato.

Sono state elaborate diverse teorie per definire come il nostro sistema uditivo distingue l'altezza tonale di differenti suoni. I più famosi sono i due descritti di seguito:

**Teoria del Luogo:** definita da Helmholtz si basa sulle osservazioni dell'anatomia dell'orecchio interno: la coclea non è un tessuto omogeneo; varia per spessore ed elasticità man mano che si incurva dalla finestra ovale verso l'elicotrema. L'effetto di ciò è che diverse parti della membrana basilare rispondono più fortemente ad alcuni suoni che ad altri. Per i suoni sinusoidali, cioè toni puri, ogni punto della membrana basilare oscilla alla stessa frequenza del suono, differendo da punto a punto per ampiezza dell'oscillazione.

Perciò ogni punto lungo la membrana basilare oscilla di una quantità diversa, a seconda della frequenza del suono: i punti vicino alla finestra ovale, all'inizio, oscillano maggiormente in risposta ai toni ad alta frequenza. I punti vicino all'elicotrema oscillano in misura maggiore in risposta ai toni a bassa frequenza.

Perciò la teoria del luogo afferma che la percezione di un tono a bassa frequenza deriva esclusivamente dal movimento di un particolare gruppo di cellule ciliate, mentre la sensazione di un tono acuto deriva dal movimento di un diverso gruppo di cellule ciliate. Ogni sensazione è perfettamente identificata con l'azione di una posizione anatomica lungo la membrana basilare.

La teoria del luogo prende questo nome perché identifica ogni altezza tonale con un punto particolare lungo la membrana basilare. Si presume che qualsiasi eccitazione di quel particolare luogo dia origine a un tono specifico.

**Teoria temporale:** Secondo la teoria del temporale, la posizione lungo la membrana basilare è irrilevante.

Piuttosto, il tono è codificato dalla velocità di attivazione delle cellule nervose nel nervo uditivo. In linea di principio, questo ha molto senso. Un tono a bassa frequenza provoca onde di movimento lente nella membrana basilare e ciò potrebbe dare origine a impulsi a basse frequenze nel nervo uditivo. Un tono ad alta frequenza provoca veloci onde di movimento nella membrana basilare e ciò potrebbe dare origine ad impulsi a frequenze elevate.

## **Loudness Perception**

L'intensità sonora, definita in inglese come *intensity*, è una grandezza fisica che misura oggettivamente il flusso di energia trasportata dall'onda sonora.

Tale grandezza non descrive correttamente però l'intensità percepita, appunto la *loudness*, in quanto essa dipende in modo decisivo dalla frequenza del suono, e in misura minore, anche dal timbro del suono stesso.

L'intensità percepita presenta quindi un legame complesso con l'intensità sonora. Per descriverla adeguatamente si ricorre ad una rappresentazione mediante delle curve isofoniche, le quali rappresentano livello di pressione che deve avere un suono, alle diverse frequenze, per provocare la stessa sensazione. In altre parole, le curve sono il luogo dei punti che determinano la stessa sensazione sonora.

Per ottenere le curve isofoniche si sottopone un ascoltatore ad un suono puro, generato da un'onda piana sinusoidale con pressione e velocità in fase, e in seguito ad un suono di riferimento di 1 dB a frequenza 1000 Hz; in seguito regolando l'intensità del suono di riferimento in modo che le due sensazioni corrispondano, si stabilisce a quale curva appartiene la coppia di valori pressione-frequenza del primo suono.

Poiché intensità sonora oggettiva e intensità sonora percepita, sono coincidenti solo al livello convenzionale di frequenza di 1000 Hz, è stata introdotta una nuova unità di misura, il phon, per misurare la intensità percepita.

L'utilità di questa differenziazione risiede nel fatto che essa permette subito di comprendere se si sta parlando di intensità sonora (in dB) o di intensità percepita (in phon).

## **La norma ISO**

Fletcher e Munson nel 1937 ottennero la prima famiglia di curve isofoniche, per ascolto binaurale in cuffia, presentando a soggetti ontologicamente normali un suono puro, alternato ad un suono di riferimento alla frequenza di 1 kHz con livello di pressione sonora variabile. Il livello di pressione sonora del suono di riferimento, per cui la sensazione sonora è uguale a quella del suono puro in esame, fu definito come livello di sensazione sonora espresso in phon. F. e M. confrontarono le sensazioni prodotte per una serie di suoni puri di diversa frequenza e intensità, ottennero una famiglia di curve,

ciascuna delle quali è caratterizzata da un valore in phon, numericamente uguale al livello di pressione sonora del tono di frequenza 1 kHz, che causa la stessa sensazione.

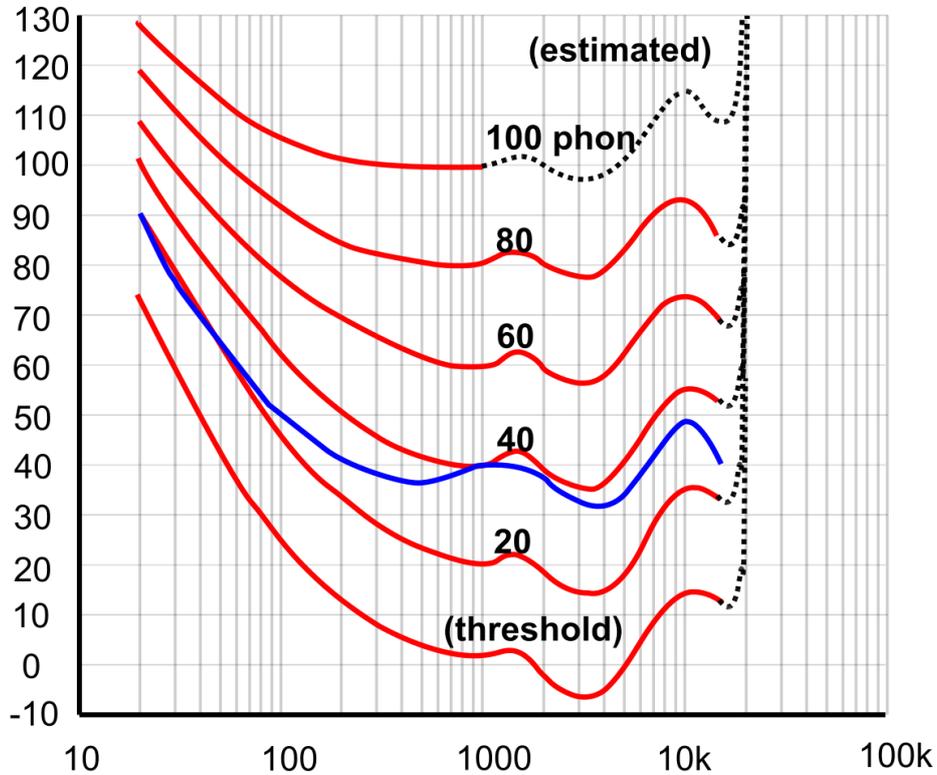


Figura 9.3 Audiogrammi di Fletcher-Munson

In rosso sono rappresentate le curve di uguale intensità come definite nello standard ISO 226:2003. In blu la curva per 40 phon secondo lo standard precedente ISO 226

Il livello di pressione sonora  $L_p$  di un tono puro di frequenza  $f$ , che ha un livello di Loudness  $L_n$  è dato da:

$$L_p : \left( \frac{10}{\alpha_f} \lg A_f \right) dB - L_U + 94 dB \quad (1)$$

Dove:

$$A_f = 4,47 \times 10^{-3} \times (10^{0,025L_n} - 1,14) + \left[ 0,04 \times 10^{\frac{T_f + L_u}{10} - 9} \right]^{\alpha_f}$$

$T_f$  is the threshold of hearing

$\alpha_f$  is the exponent for loudness perception

$L_u$  is a magnitude of the linear transfer function normalized at 1 000  $H_z$

L'equazione (1) si applica, a ciascuna frequenza, per i valori da un limite inferiore di 20 phon ai seguenti limiti superiori:

20 $H_z$  to 4 000 $H_z$ : 90 Phon

5 000 $H_z$  to 12 500 $H_z$ : 80 Phon

L'equazione (1) è solo informativa per livelli di Loudness inferiori a 20 Phon a causa della mancanza di dati sperimentali tra i 20 Phon e le soglie uditive. Lo stesso vale per i livelli di Loudness superiori a 90 Phon fino a 100 Phon da 20 Hz a 1 000 Hz perché i dati di un solo istituto sono disponibili a 100 Phon

Parametri dell'equazione (1) utilizzati per calcolare i normali delle curve isofoniche:

| Frequency, $f$<br>Hz | $\alpha_f$ | $L_u$<br>dB | $T_f$<br>dB | Frequency, $f$<br>Hz | $\alpha_f$ | $L_u$<br>dB | $T_f$<br>dB |
|----------------------|------------|-------------|-------------|----------------------|------------|-------------|-------------|
| 20                   | 0,532      | -31,6       | 78,5        | 1 250                | 0,246      | -2,7        | 3,5         |
| 25                   | 0,506      | -27,2       | 68,7        | 1 600                | 0,244      | -4,1        | 1,7         |
| 31,5                 | 0,480      | -23,0       | 59,5        | 2 000                | 0,243      | -1,0        | -1,3        |
| 40                   | 0,455      | -19,1       | 51,1        | 2 500                | 0,243      | 1,7         | -4,2        |
| 50                   | 0,432      | -15,9       | 44,0        | 3 150                | 0,243      | 2,5         | -6,0        |
| 63                   | 0,409      | -13,0       | 37,5        | 4 000                | 0,242      | 1,2         | -5,4        |
| 80                   | 0,387      | -10,3       | 31,5        | 5 000                | 0,242      | -2,1        | -1,5        |
| 100                  | 0,367      | -8,1        | 26,5        | 6 300                | 0,245      | -7,1        | 6,0         |
| 125                  | 0,349      | -6,2        | 22,1        | 8 000                | 0,254      | -11,2       | 12,6        |
| 160                  | 0,330      | -4,5        | 17,9        | 10 000               | 0,271      | -10,7       | 13,9        |
| 200                  | 0,315      | -3,1        | 14,4        | 12 500               | 0,301      | -3,1        | 12,3        |
| 250                  | 0,301      | -2,0        | 11,4        |                      |            |             |             |
| 315                  | 0,288      | -1,1        | 8,6         |                      |            |             |             |
| 400                  | 0,276      | -0,4        | 6,2         |                      |            |             |             |
| 500                  | 0,267      | 0,0         | 4,4         |                      |            |             |             |
| 630                  | 0,259      | 0,3         | 3,0         |                      |            |             |             |
| 800                  | 0,253      | 0,5         | 2,2         |                      |            |             |             |
| 1 000                | 0,250      | 0,0         | 2,4         |                      |            |             |             |

Fig. 10.3 Parametri per curve isofoniche

Il livello di Loudness  $L_n$  di un tono puro di frequenza  $f$ , che ha un livello di pressione sonora  $L_p$ , è dato da :

$$L_n = (40 \lg B_f) Phon + 94 Phon$$

Dove :

$$B_f = \left[ 0,4 \times 10^{\left(\frac{L_p + L_u}{10} - 9\right)} \right]^{\alpha_f} - \left[ 0,4 \times 10^{\left(\frac{T_f + L_u}{10} - 9\right)} \right]^{\alpha_f} + 0,005 076$$

$T_f$  is the thershold of hearing

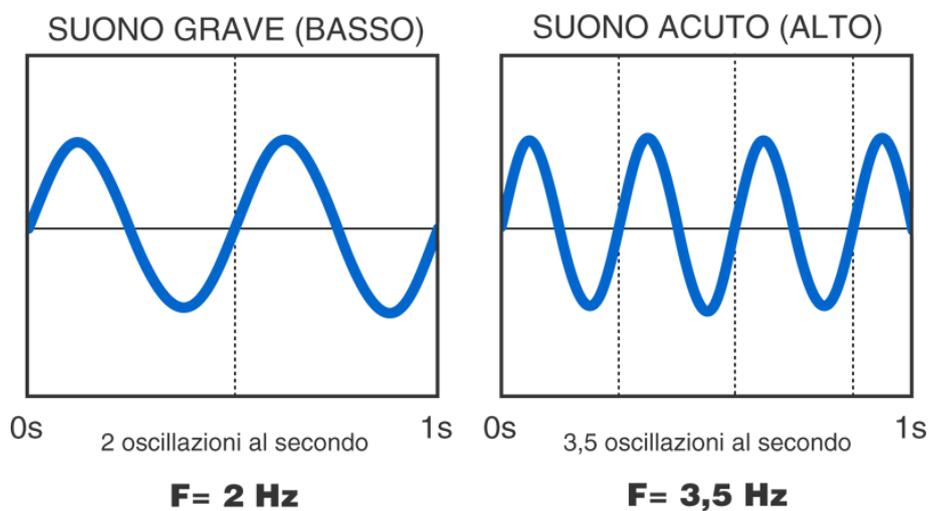
$\alpha_f$  is the exponent for loudness perception

$L_u$  is a magnitude of the linear transfer function normalized at 1 000  $H_z$

## Timbre Perception

Possiamo fornire una definizione comunemente accettata di timbro, che è la seguente: Il timbro è la qualità percepita di un suono che ci permette di distinguere due suoni che hanno la stessa altezza e la stessa intensità.

In parole più semplici il timbro è la qualità del suono che ci permette di distinguere la voce di un violino da quella di un flauto, quando i due strumenti stiano emettendo una stessa nota.



*Fig. 11.3 Differenza tra suono grave e suono acuto*

Poiché il timbro è quell'attributo che ci permette di giudicare diversi due suoni che abbiano stessa intensità, stessa altezza e stessa durata; possiamo considerare che il esso faccia riferimento a due proprietà differenti del suono:

- Identità del suono: differenza tra un suono prodotto da una particolare sorgente, come ad esempio un oboe, da quello prodotto da un'altra sorgente come una chitarra, sebbene i due siano caratterizzati dalla stessa altezza sonora e dalla stessa durata. Questa proprietà è legata agli aspetti temporali del suono.
- Qualità del suono: anche se un suono mantiene la sua identità in differenti condizioni, la sua qualità può cambiare in molti modi. Ad esempio, il suono di un violino in una sala di concerto o sentito al telefono, ha qualità molto diversa, ma è sempre riconosciuto come suono di violino. Questa proprietà è legata ad aspetti spettrali del suono.

In genere si considera che il timbro è determinato in primo luogo dallo spettro di potenza dello stimolo sonoro, in secondo luogo dalla forma d'onda (fase), dall'intensità e dalle caratteristiche temporali.

Studi sperimentali hanno mostrato che il timbro è determinato dalla distribuzione della potenza acustica nelle bande critiche, non dai rapporti di intensità delle varie armoniche con la fondamentale.

Il timbro di un suono non è tuttavia determinato esclusivamente dalla configurazione statica dello spettro. Qualsiasi suono reale è caratterizzato da una continua evoluzione temporale dello spettro.

La dinamicità dello spettro è particolarmente accentuata nelle fasi di transitorio del suono quali l'attacco, particolarmente importanti per il riconoscimento timbrico e per l'identificazione dello strumento. La fase a regime dei suoni strumentali è comunque caratterizzata da variazioni spettrali minori che conferiscono naturalezza al suono.

Si può osservare che il timbro non è un attributo mono-dimensionale, come l'altezza tonale o l'intensità. Infatti, per l'altezza tonale, dati due suoni è possibile stabilire quale dei due è più alto e quale più basso, e in maniera analoga per l'intensità. Per il timbro non vale una analoga proprietà.

Generalmente si definisce un così detto spazio timbrico, caratterizzato secondo tre dimensioni percettive:

- 1) Una prima dimensione, legata alla qualità dell'attacco del suono, che permette di distinguere suoni pizzicati e percossi dai suoni dei fiati e archi. Questa dimensione risulta correlata con il logaritmo della durata dell'attacco.
- 2) La seconda dimensione è legata alla brillantezza del suono e distingue suoni che presentano molta energia alle alte parziali, da quelli in cui l'energia è concentrata nelle prime parziali. Risulta correlata al baricentro dello spettro.
- 3) la terza dimensione è la più incerta da interpretare. Secondo alcuni sembra dipendere dalla variazione spettrale tra parziali adiacenti, cioè se lo spettro è più o meno frastagliato. Secondo altri dal flusso spettrale, cioè dalla variabilità temporale dell'andamento delle parziali.

## LA TEORIA DEL SOUND QUALITY

Il concetto di sound quality negli ultimi anni ha acquisito sempre maggiore importanza, a livelli tali da poter considerare il suono emesso come se fosse un elemento di design. Nei differenti settori sono state spese molte risorse nel raggiungimento di target acustici specifici, non solamente come mero livello di pressione sonora ma soprattutto come qualità acustica. Diverse ricerche hanno prodotto modelli articolati per permettere il raggiungimento di tali obiettivi, nelle più svariate situazioni industriali e con obiettivi differenti. Generalmente i modelli proposti sfruttano differenti mix di parametri acustici e psicoacustici per raggiungere tali obiettivi, mostrando lo stretto legame che intercorre fra psicoacustica e sound quality. Si può quindi affermare che la psicoacustica vada a colmare il gap fra le grandezze misurabili fisicamente e le valutazioni soggettive, ricordando che comunque, il responso finale sull'adeguatezza di un suono, passa attraverso il nostro sistema uditivo. Infatti, la psicoacustica è quella parte dell'acustica che si occupa del funzionamento dell'apparato uditivo e studia la percezione che l'uomo ha dei suoni che lo circondano. L'obiettivo della psicoacustica è capire come le persone percepiscono e sperimentano il suono, indipendentemente dallo scopo per il quale esso sia prodotto. Il modo in cui un individuo interpreta un suono o un brano musicale infatti suscita sensazioni diverse. Basti pensare al fatto che il suono della sirena di un'ambulanza viene percepito in un modo completamente differente rispetto ad un brano dei Pink Floyd; proprio perché cambiando tutti i parametri che compongono il suono, questi gli conferiranno una particolare caratteristica, ed è tale caratteristica che va a definire quelle che sono le differenti sensazioni o emozioni che un ascoltatore prova durante l'ascolto, associando in seguito a tale suono anche un ricordo o un'azione. In "Psychoacoustic fact and models", Zwicker descrive "the future of the human hearing system in acoustical communications" ovvero, la comunicazione acustica è uno dei prerequisiti fondamentali per l'esistenza della società umana. Inoltre, in una società consumistica come la nostra, il concetto di sound quality può essere esteso non solo all'ambito musicale, ma anche quello dell'elettronica di consumo. Molti parametri infatti vengono adoperati anche per rispettare quelli che sono i limiti dell'inquinamento acustico, o anche semplicemente per rendere un prodotto più "appetibile" sul mercato. Tutti noi d'altronde preferiremmo avere in casa una lavatrice che produca meno rumore possibile o comunque un rumore qualitativamente accettabile, piuttosto che avere una lavatrice che ci dia la sensazione di vivere accanto ad un aeroporto.

Per tale scopo sono state definite metriche di valutazione standardizzate nella famiglia delle ISO532. Lo scopo della serie ISO532 è quello di specificare la procedura di calcolo basata sulle proprietà fisiche del suono per stimare la loudness e il livello di loudness del suono percepito da una persona normo udente in condizioni di ascolto specifiche.

## **Test di ascolto**

L'interpretazione della sensazione uditiva e la consapevolezza dell'ambiente circostante è rappresentativa di un'esperienza sonora dell'ambiente stesso.

In acustica applicata, la valutazione della sonorità e della rumorosità negli ambienti acustici viene fatta effettuando misure in campo in accordo con le normative vigenti e soprattutto al tipo di valutazioni richieste. Anche per le misure di psicoacustica l'iter di valutazione risulta essere standardizzato; la particolarità di tale disciplina è appunto la soggettività. Le esperienze e le aspettative degli individui giocano un ruolo fondamentale per l'identificazione di un parametro generale atto ad indicare uno standard qualitativo sonoro della sorgente sotto esame. Per tal ragione abbiamo costruito un test di ascolto ad hoc per il caso studio.

Il test d'ascolto consiste in una serie di domande che vanno ad indagare la piacevolezza e la qualità acustica del brano proposto.

Per la costruzione del test abbiamo seguito le indicazioni fornite nella raccomandazione ITU BS.1116, la quale ci fornisce indicazioni in merito alle scale di gradimento da utilizzare quando si compiono indagini di questo tipo. La scelta del brano è stata cruciale poiché è stato selezionato un noto brano appartenente al cantautorato italiano al quale si è scelto di comparare una versione coverizzata che presenta però un timbro e un tono differente dall'originale.

Si è scelto dunque di costruire un test a "comparazione forzata" durante il quale all'ascoltatore si chiede non solo di esprimere una sensazione positiva o negativa in merito al brano ascoltato, ma anche di comparare le due versioni, contando su una scala graduata (da 1 a 5), dove 1 rappresenta il minor gradimento e 5 il massimo.

La scelta forzata ci permetterà di dare ulteriori indicazioni in merito alla gradevolezza dei suoni proposti.

A causa della pandemia il test d'ascolto è stato creato come form Google e divulgato attraverso l'uso di social media. Nonostante la qualità audio potrebbe risultare inferiore, rispetto ad una traccia ascoltata in camera controllata, questo processo ci ha permesso

di ottenere un numero molto elevato di risposte. Dato fondamentale per la valutazione dell'inferenza statistica.

Di seguito si riporta il test.

Sezione 1 di 2

### VALUTAZIONE DELLA QUALITA' SONORA DI UNA TRACCIA AUDIO

Si chiede all'ascoltatore di compilare il test in tutte le sue parti e di valutare secondo i criteri elencati il grado di piacevolezza della traccia proposta.  
Il test è completamente anonimo e i risultati verranno usati solo per scopi di ricerca.

**Genere**

M

F

Altro...

**Età \***

Under 15

16-25

26-35

36-45

46-55

Over 55

**Che tipo di Ascoltatore sei? \***

Musicista

Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)

Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base)

**Che generi musicali ascolti?**

Seleziona il tuo genere

Classica - Lirica

Blues - Jazz

Latina

Rock - Metal

Hip Hop - Rap

Disco - House

Pop - Commercial

Cantautorato

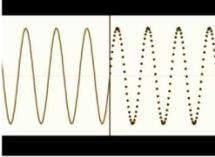
Fig. 1.4 Valutazione per genere, età, tipo di ascoltatore

Sezione 2 di 2

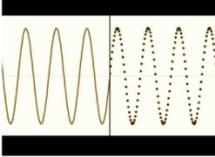
### Modello TEST di Ascolto - Comparativo

Si chiede all'ascoltatore di ascoltare per quante volte lo ritiene necessario la traccia A e la traccia B. Dopo l'ascolto compilare il questionario in tutte le sue parti.

**TRACCIA A ... 30 s**



**TRACCIA B ... 30 s**



Quale delle due versioni della canzone ti è più familiare? \*

|             |                       |                       |                       |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|             | A                     | B                     | Non mi è familiare    |
| Familiarità | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**Compara le due versioni appena ascoltate**  
Attribuisci un aggettivo che rappresenta la versione A o B

|                    | A                     | B                     | A+B (entrambi)        |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Piacevole          | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Rilassante         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Rumoroso           | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Noioso             | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Caotico            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Lento - Tranquillo | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Malinconico        | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Travolgente        | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Nostalgico         | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**Come descriveresti il brano TRACCIA A appena ascoltato? \***  
1 (Assolutamente in disaccordo), 2 (In disaccordo), 3 (Né d'accordo, né in disaccordo), 4 (D'accordo), 5 (Assolutamente d'accordo)

|             | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Piacevole   | <input type="radio"/> |
| Rilassante  | <input type="radio"/> |
| Rumoroso    | <input type="radio"/> |
| Noioso      | <input type="radio"/> |
| Caotico     | <input type="radio"/> |
| Soft        | <input type="radio"/> |
| Malinconico | <input type="radio"/> |
| Travolgente | <input type="radio"/> |

**Come descriveresti il brano TRACCIA B appena ascoltato? \***  
1 (Assolutamente in disaccordo), 2 (In disaccordo), 3 (Né d'accordo, né in disaccordo), 4 (D'accordo), 5 (Assolutamente d'accordo)

|             | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Piacevole   | <input type="radio"/> |
| Rilassante  | <input type="radio"/> |
| Rumoroso    | <input type="radio"/> |
| Noioso      | <input type="radio"/> |
| Caotico     | <input type="radio"/> |
| Soft        | <input type="radio"/> |
| Malinconico | <input type="radio"/> |
| Travolgente | <input type="radio"/> |
| Nostalgico  | <input type="radio"/> |
| Ritmato     | <input type="radio"/> |

**Come valuti la qualità audio delle due versioni? \***  
1 (Qualità Bassissima) - 5 (Qualità Altissima)

|            | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |
|------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Versione A | <input type="radio"/> |
| Versione B | <input type="radio"/> |

Fig. 2.4 Sensazioni e preferenze

## Risultati dell'analisi soggettiva del test

Dopo aver ottenuto un numero di risposte valide pari a 50, si è andato a valutare l'andamento dei dati soggettivi grazie anche all'aiuto delle rappresentazioni grafiche forniteci da Google in relazione all'andamento generale dei questionari svolti.

Di seguito si riportano i grafici relativi alle informazioni generali dell'ascoltatore.

Genere  
50 risposte

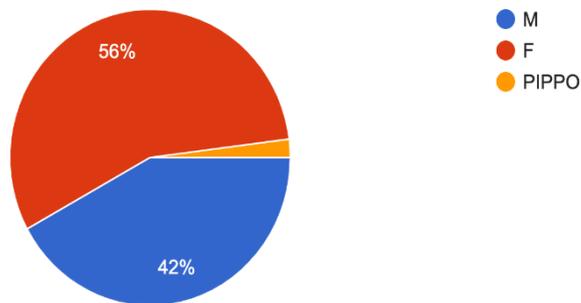


Fig. 3.4 Grafico a torta per genere

Età  
50 risposte

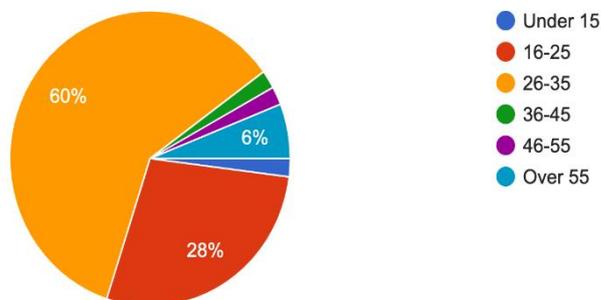


Fig. 4.4 Grafico a torta per età

Nella tabella sottostante si riportano i risultati preliminari del test d'ascolto dove sono indicati le varietà di genere, il range di età e la selezione dei generi musicali proposti.

| Genere | Età | Che tipo di Ascoltatore sei? | Classica - Lirica  | Blues - Jazz | Latina | Rock - Metal | Hip Hop - Rap | Disco - House | Pop - Commercial | Cantautorato |
|--------|-----|------------------------------|--|--------------|--------|--------------|---------------|---------------|------------------|--------------|
| 1      | F   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        |              |               |               | x                | x            |
| 2      | M   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x            |        |              | x             | x             |                  |              |
| 3      | F   | 16-25                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x            | x      |              | x             |               | x                | x            |
| 4      | F   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              | x      |              |               |               | x                | x            |
| 5      | M   | 26-35                        | Musicista  |              | x      |              | x             |               | x                |              |
| 6      | F   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        |              |               |               | x                |              |
| 7      | M   | 26-35                        | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    |              |        |              | x             |               | x                | x            |
| 8      | M   | 16-25                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x            | x      | x            | x             | x             | x                | x            |
| 9      | M   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        |              |               |               | x                | x            |
| 10     | M   | 16-25                        | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    | x            |        | x            | x             | x             | x                |              |
| 11     | M   | 26-35                        | Musicista  |              | x      |              | x             |               |                  | x            |
| 12     | M   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x            | x      |              |               | x             |                  |              |
| 13     | F   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        |              |               |               | x                |              |
| 14     | F   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        | x            |               | x             | x                | x            |
| 15     | F   | 16-25                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              | x      |              |               | x             | x                | x            |
| 16     | M   | 26-35                        | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |              |        |              | x             |               | x                |              |

|    |   |         |  |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|---|---------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 17 | F | 26-35   | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    | x | x |   | x | x | x |   | x |
| 18 | M | 36-45   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x |   |   | x |   |
| 19 | M | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   |   |   | x |   |
| 20 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   |   |   | x |   |
| 21 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x | x |   |   | x |
| 22 | M | 26-35   | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    |   |   |   | x |   |   |   |   |
| 23 | F | 26-35   | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    |   |   | x | x | x |   | x | x |
| 24 | M | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x |   |   |   |   |
| 25 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   | x | x | x |   | x | x |
| 26 | M | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   |   |   | x |   |
| 27 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   | x | x | x | x |
| 28 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x | x |   | x |   |   |   | x |
| 29 | F | 16-25   | Musicista  |   | x |   |   | x |   |   | x |
| 30 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x | x |   | x | x |
| 31 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x |   | x | x | x | x | x | x |
| 32 | M | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   | x |   | x | x |
| 33 | M | 26-35   | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    | x | x |   | x | x | x | x | x |
| 34 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   | x |   |   |   | x | x |
| 35 | M | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x | x | x | x |   |
| 36 | F | Over 55 | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   | x |   |   |   |   | x | x |

|    |   |         |  |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|---|---------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 37 | M | Over 55 | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    | x |   |   |   |   | x |   | x |
| 38 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   | x |   | x |   |   |   | x |
| 39 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x | x |   | x | x |
| 40 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   | x | x | x |   | x | x |
| 41 | F | 16-25   | Ascoltatore Esperto (audiofilo o grande appassionato)    |   |   |   | x |   |   |   |   |
| 42 | M | Over 55 | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x | x |   | x |   |   |   | x |
| 43 | M | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   | x | x |   |   |
| 44 | M | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   | x | x |   |   |
| 45 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   | x |   | x |   | x |   |
| 46 | M | 46-55   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   | x |   |   | x |   |
| 47 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x |   |   |   |   |   | x | x |
| 48 | F | 16-25   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) | x |   |   |   |   |   | x | x |
| 49 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   |   |   |   |   | x | x |
| 50 | F | 26-35   | Ascoltatore Medio (senza particolari conoscenze di base) |   |   | x |   |   |   |   | x |

*Fig. 5.4 Risultati definitivi*

L'analisi data, è stata condotta sfruttando i due modelli matematici offerti dalla letteratura. Per prima cosa si è calcolato, media e deviazione standard (STD) delle risposte ottenute per mezzo del questionario. La normalizzazione del dataset è un'operazione di fondamentale importanza; il calcolo della media nell'intorno del gap ( 1-5 ) mette in luce la comparazione che esiste tra le sensazioni in funzione della media dei giudizi ottenuti.

Di seguito si riporta il grafico dove si evidenzia la comparazione in termini di sensazioni soggettive delle due tracce proposte.

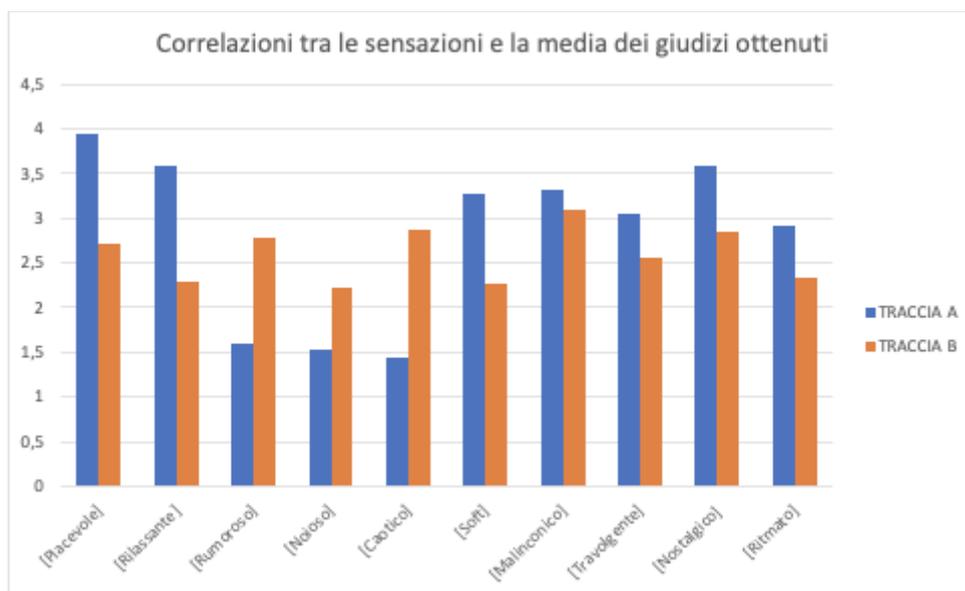


Fig. 6.4 Correlazioni tra sensazioni e giudizi finali

Infine l'analisi dei risultati preliminari ci ha permesso di individuare quella che secondo gli ascoltatori coinvolti, risulta essere la traccia audio con qualità maggiore.

La traccia A raggiunge un risultato pari a : 3.6 a discapito della traccia B : 2.5.

Dal grafico si evince che la traccia A risulta avere un punteggio maggiore della traccia B in termini di piacevolezza. Questo risultato è concorde poiché la media degli ascoltatori attribuisce anche un punteggio elevato rispetto alla sensazione di nostalgia e malinconia. Tale risultato potrebbe essere dettato dal fatto che l'ascoltatore si sia fatto condizionare dal legame affettivo con la traccia originale.

## CONCLUSIONI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi si è quello di approfondire il modo in cui la qualità sonora influisca sul pensiero soggettivo di un ascoltatore, e di come la psicoacustica giochi un ruolo di rilevante importanza all'interno della società attuale. Grazie al test di ascolto che è stato svolto, si è potuto riscontrare infatti che il sound quality risulta un parametro fondamentale nella scelta di un brano musicale. Possiamo per tanto affermare che, ciò che viene percepito come un prodotto di maggiore qualità, oltre ad avere riscontri prettamente psicologici, quali (sensazione di relax, sensazioni motivazionali, sensazione di benessere, o semplicemente conciliazione allo studio, alla creatività o anche al riposo), può avere riscontri soprattutto economici. Basti pensare all'industria musicale, dove gli utenti grazie anche e soprattutto al progresso tecnologico che offre apparecchiature di qualità sempre più elevata ad un prezzo sempre più ragionevole, sono abituati a cercare uno standard qualitativo per l'ascolto musicale, (sia esso anche semplicemente per scopi ricreativi) sempre più elevato; dato che, da quanto si evince dal test effettuato, intercorre una correlazione abbastanza nitida tra la percezione della qualità e le sensazioni che si provano. Da qui si intuisce anche l'importanza di sviluppare modelli matematici accurati, che siano in grado di standardizzare e analizzare tutti quei parametri che vanno poi a definire la qualità di una traccia musicale e di conseguenza tutti i fattori che ne derivano.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Murray Schafer, R., "*The New Soundscape*", BMI CANADA LIMITED, 1969
- [2] Murray Schafer, R. "The tuning of the world", 1977.
- [3] Jo, H., Seo, R., Jeon, J., "*Soundscape assessment methods: Compatibility of questionnaires and narrative interview based on ISO 12913-2*", 2020.
- [4] Zwicker E., Fastl H., "*Psychoacoustics Facts and Models*", Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 1990.
- [5] PSICOACUSTICA: DEGUSTARE UN RUMORE Andrea Cerniglia, Gelsomina Di Feo; associazione P.E.S.C.A.S.
- [6] Tesi di laurea di Erica Tavazzi: (Valutazione soggettiva di un modello di campo vicino per la percezione binaurale della distanza relativa tra sorgenti sonore virtuali)
- [7] "Lezioni del Corso di psicoacustica" Ing.Fabio Serpilli, Ing.Samantha Di Loreto.