



**Politecnico di Bari  
I<sup>a</sup> Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea in Ingegneria Informatica**

**Corso di Fisica Tecnica  
A.A. 2002/2003**

# **Elementi di psicoacustica**

**Dott. Ing. Francesco Martellotta**

# 1

## Fisiologia dell'orecchio

### 1.1 Il funzionamento dell'orecchio umano\*

Le nostre orecchie sono dispositivi molto sofisticati il cui compito è quello di convertire le variazioni di pressione dell'aria (cioè la pressione acustica), in impulsi nervosi (ovvero segnali elettrici) che vengono poi interpretati dal cervello. Questa conversione avviene per mezzo dei diversi componenti del nostro orecchio (v. Figura 1), che può essere scomposto in orecchio esterno, medio ed interno.

L'*orecchio esterno* è composto dal padiglione auricolare, dal condotto uditivo e dal timpano. Il *padiglione auricolare* è la parte visibile dell'orecchio; la sua parte più interna serve a “guidare” i suoni aventi lunghezze d'onda più brevi verso timpano. Il *condotto uditivo*, lungo dai 2,5 ai 3 cm serve a proteggere il timpano dalla polvere e da eventuali oggetti appuntiti. Il *timpano* (o membrana timpanica) è un sottile disco di tessuto fibroso che si dilata verso l'interno o verso l'esterno, in accordo con le variazioni di pressione dell'aria.

L'*orecchio medio* è il blocco che si trova subito dopo il timpano. È connesso con il cavo rino-faringeo mediante la *tromba di Eustachio*, il cui compito è quello di permettere che vi sia la stessa pressione da entrambi i lati della membrana timpanica. Se la pressione non fosse la stessa, il timpano verrebbe compresso dal lato che si trova a pressione più elevata, venendo così limitato nelle sue vibrazioni, col risultato di ridurre la nostra capacità uditiva, particolarmente alle basse frequenze.

*Un tipico esempio dell'intervento delle trombe di Eustachio si ha quando si viaggia in auto o in aereo e si sale (o scende) di quota: fintanto che il bilanciamento delle pressioni non avviene si ha chiaramente la sensazione di avere le “orecchie tappate”.*

---

\* Questo paragrafo è di natura “informativa”, non costituisce cioè argomento di esame, tuttavia la sua lettura è raccomandata per avere una più ampia visione della percezione del suono.

L'orecchio medio contiene tre ossicini, chiamati *martello*, *incudine* e *staffa*. Questi funzionano come un sistema di leve che amplifica le vibrazioni meccaniche del timpano (a cui è solidale il martello) e le trasmette all'orecchio interno mediante la staffa che è vincolata alla *finestra ovale* che, insieme alla *finestra circolare*, sono le due piccole aperture membranose che mettono in comunicazione orecchio medio ed orecchio interno. Nell'orecchio medio vi sono anche due muscoli: il *tensor tympani* e lo *stapedio*. Entrambi hanno la funzione di limitare la trasmissione sonora, (contraendosi, infatti, limitano i movimenti del timpano e degli ossicini), proteggendo l'orecchio da suoni aventi un livello troppo elevato (superiore ai 90-100 dB). Insieme possono fornire una attenuazione superiore ai 20 dB alle frequenze inferiori ad 1 kHz.

L'*orecchio interno* occupa un labirinto di varchi nell'osso temporale, comprendendo anche i *canali semicircolari* che sono sensibili alle variazioni dell'orientamento della testa. La *coclea* è un condotto a forma di chiocciola al cui interno vi è una struttura molto complessa denominata *partizione cocleare*. Questa separa due regioni denominate *scala vestibuli* e *scala tympani* per l'intera lunghezza della coclea, ad eccezione di una piccola apertura posta nel punto più lontano dall'orecchio medio e denominata *helicotrema*. La partizione ha un centro cavo denominato *dotto cocleare* che contiene la *membrana basilare* dalle cui vibrazioni dipendono le nostre sensazioni uditive. In particolare, l'*Organo del Corti* contiene più di 20000 cellule sensoriali cigliate, ciascuna delle quali è eccitata quando si muove una particolare parte della membrana, convogliando gli stimoli al *nervo uditivo*.

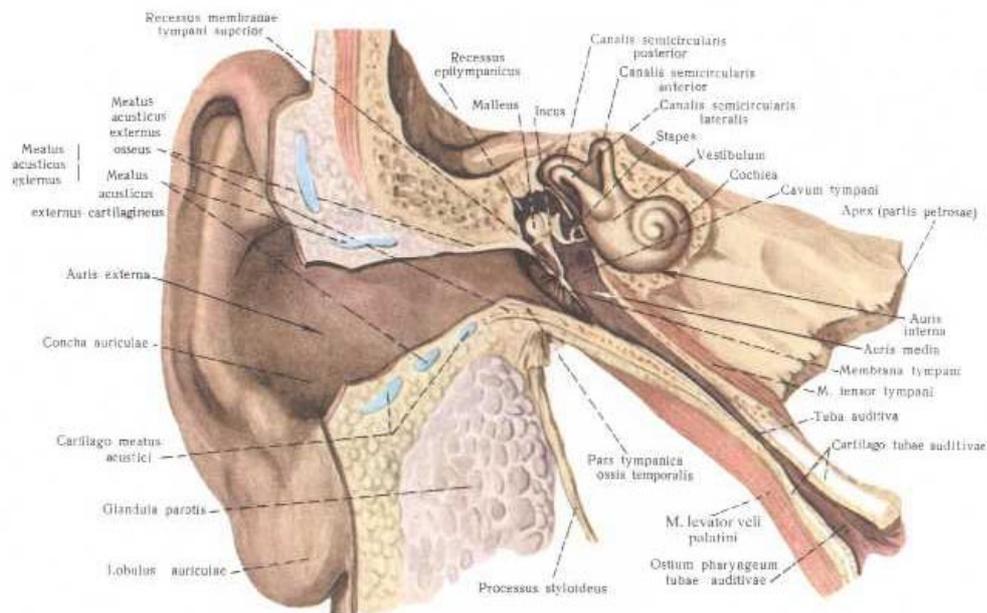


Figura 1 – Rappresentazione anatomica dell'orecchio umano

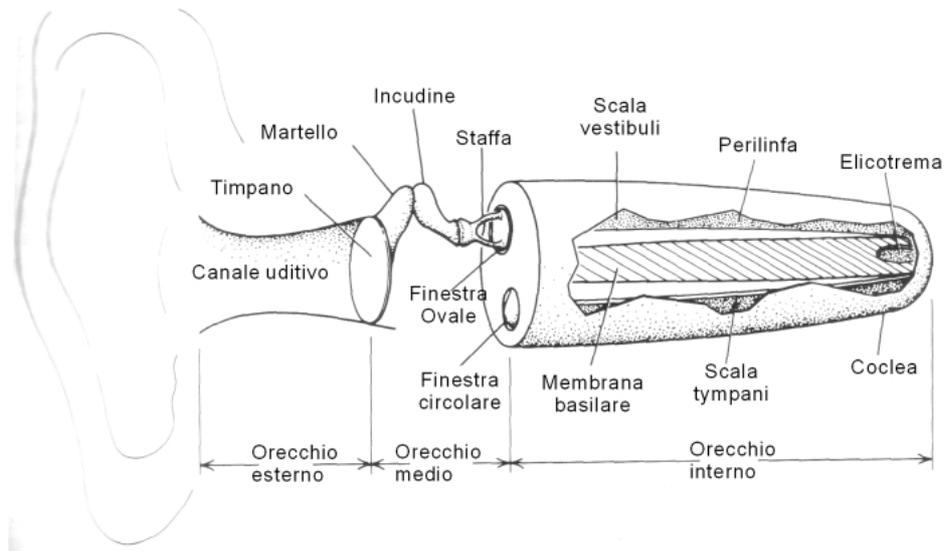


Figura 2 – Schematizzazione dell'orecchio, con enfattizzazione delle parti più importanti per l'ascolto e con la coclea "srotolata". (figura tratta da Rif. [1])

È importante osservare che se si "srotola" la coclea (v. Figura 2), si può osservare che la membrana basilare è stretta e rigida vicino alla base (cioè alle due "finestre"), mentre diventa più ampia e meno rigida in corrispondenza dell'apice (cioè dell'elicotrema). Ciò fa sì che le alte frequenze riescano ad eccitare solo la parte della membrana prossima alla base per poi smorzarsi in misura significativa verso l'apice. Al contrario, per le basse frequenze le vibrazioni cominciano alla base, ma raggiungono il loro picco di ampiezza in prossimità dell'apice (v. Figura 3). Dal momento che nella coclea il suono si propaga in un liquido, la *perilinfia*, si può ritenere che tanto i suoni di bassa che quelli di alta frequenza raggiungano la membrana basilare nello stesso momento, quindi ciò lascia supporre che l'azione della membrana basilare sia simile a quella di un banco di filtri, in cui ogni zona è sensibile ad una diversa frequenza o meglio, come si vedrà in seguito, ad un diverso intervallo di frequenze. A conferma di ciò si è osservato anche che le cellule cigliate che ricoprono la membrana basilare sono differenziate in funzione della diversa posizione.

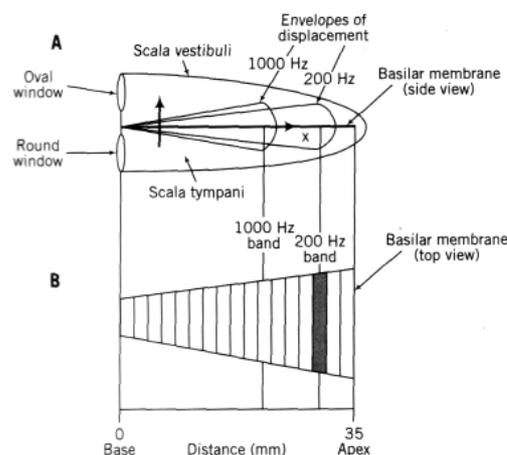


Figura 3 – Rappresentazione grafica dell'attività lungo la membrana basilare. (da Rif. [1])

## 1.2 Limiti di udibilità

L'orecchio umano non percepisce suoni che abbiano una intensità troppo bassa, come pure non è in grado di rispondere a suoni che abbiano una tonalità troppo bassa o troppo alta. La zona di maggiore sensibilità risulta infatti compresa fra le frequenze di 2 e 6 kHz, mentre il campo di udibilità si estende indicativamente fra i 20 Hz ed i 20 kHz.

Per quanto riguarda l'intensità è opportuno tenere presente che il valore di riferimento dell'intensità acustica (pari a  $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>), corrispondente ad un livello di 0 dB dovrebbe essere il più debole che il nostro orecchio è in grado di percepire. Tuttavia, la maggior parte dei soggetti richiede livelli di almeno 10, 20 dB relativamente alle frequenze di maggiore sensibilità, e valori sensibilmente più alti alle altre frequenze.

Per quanto riguarda la diversa sensibilità alle diverse frequenze va detto che, anche in questo caso, si assume l'intervallo che va dai 20 Hz ai 20 kHz perché è più facile da ricordare, tuttavia le differenze individuali sono grandissime. Per un giovane in buona salute la massima frequenza percepibile si aggira sui 17-18 kHz, mentre andando avanti con l'età questo limite tende ad abbassarsi fino ad arrivare ai 12 kHz per le donne, e ai 5 kHz per gli uomini. Analogamente per le basse frequenze è raro riuscire a percepire suoni che abbiano una frequenza minore di 30 Hz, anche se, in particolari condizioni, è possibile riuscire a percepire onde sinusoidali che abbiano frequenze di 20-15 Hz. Al di sotto dei 20 Hz la sensibilità dell'orecchio è così bassa che è più facile "sentire col corpo" che "sentire con le orecchie". Infatti quando l'intensità del suono supera i 100 dB e, in maniera distinta, quando si superano i 120 dB tutto il corpo riesce a percepire le vibrazioni sonore.

*Un tipico caso in cui si può sentire il suono "con tutto il corpo" è quando ci si trova in prossimità di grossi altoparlanti (da discoteca) che, per le loro dimensioni, riescono a riprodurre bene anche suoni di bassa frequenza. È opportuno tenere conto che una esposizione prolungata a suoni continui aventi frequenze minori di 20 Hz (infrasuoni) può dar luogo a nausea (per via di disturbi nei canali semicircolari) e, nei casi più gravi, ad emorragie interne.*

# 2

## Psicoacustica

### 2.1 La descrizione soggettiva del suono

Per poter descrivere un suono continuo (e quindi periodico) in termini fisici sono sufficienti tre parametri: l'*intensità acustica*, la *frequenza* e la *forma d'onda*. Una volta che questi siano noti è possibile descrivere e riprodurre il suono in maniera univoca. L'intensità fornisce le informazioni relative all'energia associata al suono, mentre la frequenza (fondamentale) e la forma d'onda, in base al teorema di Fourier, permettono di ricavare la composizione spettrale del suono.

Dal punto di vista soggettivo l'equivalente dei tre descrittori prima citati è dato rispettivamente dalla *intensità soggettiva*, dal *tono* (o *tonalità*) e dal *timbro*. È bene tenere presente, però, che ciascun descrittore soggettivo, benché influenzato in misura preponderante dal corrispondente parametri oggettivo, dipende, in misura minore, anche dagli altri fattori fisici. Lo studio di tali relazioni esula, tuttavia, dagli scopi di questo corso, pertanto nel seguito ci si concentrerà essenzialmente sul rapporto fra intensità soggettiva ed intensità acustica.

### 2.2 Intensità acustica ed intensità soggettiva

La relazione fra intensità acustica ed intensità soggettiva è semplice: quanto maggiore è la variazione di pressione acustica, tanto maggiore è lo spostamento della membrana timpanica, degli ossicini, della perilinfa e, infine, della membrana basilare. Un moto più intenso della membrana basilare si traduce in una stimolazione maggiore delle cellule cigliate e, quindi, in più impulsi nervosi trasmessi al cervello. Le cellule nervose, infatti, non sono in grado di trasmettere un segnale "analogico", cioè proporzionale allo stimolo, ma solo "impulsi" tutti della stessa intensità, per cui una stimolazione più intensa si traduce nella emissione di un numero maggiore di impulsi da parte di un maggior numero di terminazioni nervose.

È poi il cervello che “interpreta” la quantità di impulsi che arrivano nell’unità di tempo traducendoli in termini di sensazione di intensità del suono.

Numerosi esperimenti hanno mostrato che è possibile definire una ragionevole corrispondenza fra intensità acustica ed intensità soggettiva, quest’ultima viene misurata in *son* e, per convenzione, si assume un valore unitario in corrispondenza di un tono puro a 1000 Hz avente un livello di 40 dB. Approssimativamente si ha un raddoppio dell’intensità soggettiva ogni 10 dB di incremento nel livello di pressione.

In virtù della diversa sensibilità dell’orecchio alle varie frequenze si avrà che la stessa intensità soggettiva di 1 son sarà prodotta da suoni di livello più basso alle frequenze fra 2 e 6 kHz e da suoni di livello più alto nelle zone di minore sensibilità, come sarà chiarito meglio di seguito.

### 2.3 L’audiogramma normale

Da quanto esposto in precedenza appare chiaro che la diversa sensibilità dell’orecchio alle diverse frequenze fa sì che suoni aventi la stessa intensità acustica (cioè la stessa energia), ma diversa frequenza danno luogo ad una sensazione di intensità soggettiva diversa.

Il modo migliore per rappresentare la relazione sussistente fra queste tre grandezze nel caso di toni puri è quello di disegnare sul piano individuato da frequenza e livello di intensità acustica l’insieme delle curve caratterizzate dalla medesima sensazione soggettiva di intensità.

Queste curve, denominate curve *isofoniche*, possono essere determinate confrontando un tono puro di riferimento a 1000 Hz con toni puri di diversa frequenza il cui livello viene adattato dai soggetti fino a produrre una sensazione di intensità uguale a quella prodotta dal tono di riferimento. Convenzionalmente si fa poi coincidere il *livello di intensità soggettiva* (misurato in *phon*) con il livello di pressione del tono di riferimento a 1000 Hz. Ripetendo tale esperimento con toni di riferimento di diversa intensità (e quindi di diverso livello) si ottiene il *diagramma di Fletcher-Munson*, noto anche come *audiogramma normale* (Figura 4).

Si noti che l’introduzione del livello di intensità soggettiva costituisce un “comodo” passaggio intermedio in cui si assegna alle curve di uguale intensità soggettiva lo stesso valore numerico del livello di pressione corrispondente al tono di riferimento. A ciascuna curva dovrebbe, infatti, essere associato il corrispondente valore della intensità soggettiva espresso in *son*. Tuttavia ciò può essere ottenuto convertendo il livello di intensità soggettiva *LL* (misurato in *phon*) nella intensità soggettiva *S* misurata in *son*, mediante la seguente relazione:

$$S = 2^{\frac{LL-40}{10}}, \quad (1)$$

basata sulla approssimazione secondo cui l’intensità soggettiva raddoppia ad ogni incremento di 10 phon nel livello di intensità soggettiva.

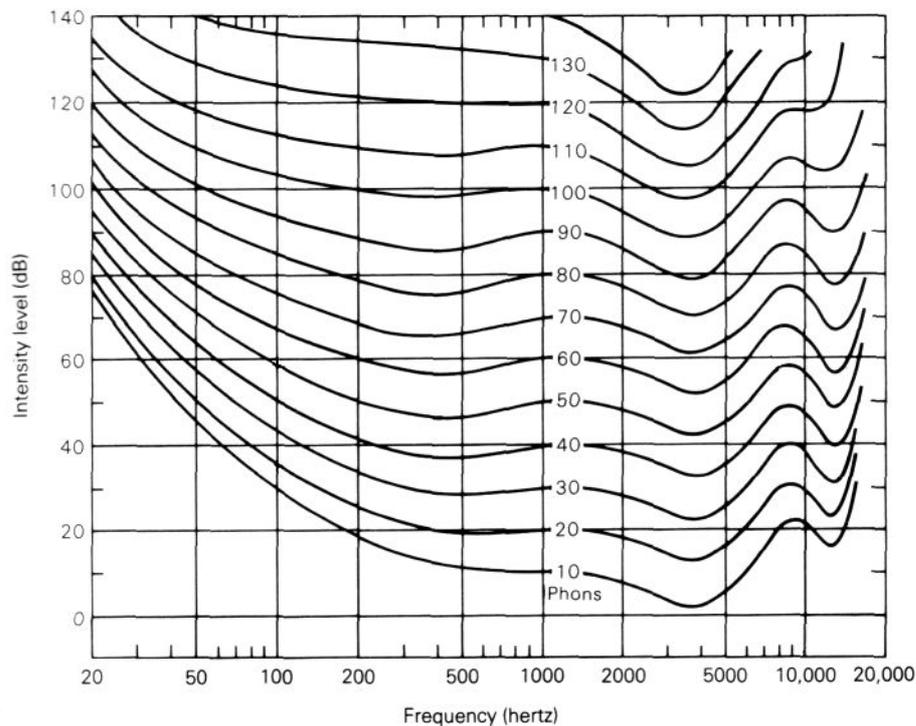


Figura 4 – Audiogramma normale di Fletcher Munson. (figura tratta da Rif. [1])

Sull'audiogramma normale è possibile individuare anche la curva corrispondente alla *soglia di udibilità* alle varie frequenze, cioè il più basso livello sonoro percepibile da un individuo in condizioni ideali. Tale soglia dovrebbe coincidere con l'isofonica a 0 phon, ma nella maggior parte dei casi la soglia di udibilità è compresa fra 0 e 20 phon. Ai 130 phon è associata invece la *soglia del dolore*, in corrispondenza della quale il suono è così forte da provocare dolore fisico.

*Una interessante applicazione delle curve isofoniche è legata alla riproduzione di brani audio con un impianto hi-fi. Supponiamo che una registrazione sia stata eseguita dal vivo con un livello sonoro che segue esattamente la isofonica a 90 phon. Nel momento in cui il brano viene riprodotto ad un livello inferiore, ad esempio ridotto di 40 dB, quello che accade è che esso verrà "percepito" come privo di basse frequenze. Infatti, nella registrazione originaria a 50 Hz il livello era 102 dB, quando questo viene ridotto di 40 dB si ha un livello risultante di 62 dB corrispondente ad un livello soggettivo di 36 phon, mentre a 1000 Hz il livello soggettivo è di 50 phon. Quindi, mentre nel suono originario il livello soggettivo era lo stesso a tutte le frequenze, nel suono riprodotto il livello soggettivo delle basse frequenze risulta attenuato. Per ottenere, quindi, una riproduzione soddisfacente per l'orecchio è necessario aumentare il livello delle basse frequenze. I dispositivi di enfattizzazione dei bassi, solitamente presenti negli impianti hi-fi, ma anche nelle autoradio o negli stereo portatili, servono proprio a sopperire a questo "difetto" del nostro orecchio.*

## 2.4 Bande critiche

Nella sezione precedente si è descritta la sensibilità dell'orecchio umano alle diverse frequenze del campo udibile. Tuttavia, l'audiogramma normale viene determinato a partire da toni puri, mentre la maggior parte dei suoni che raggiungono il nostro orecchio sono di tipo complesso. Pertanto si sono resi necessari altri tipi di esperimenti per comprendere più a fondo il comportamento in presenza di toni multipli.

### 2.4.1 L'esperimento di Fletcher

Si è visto nella sezione 1.1 che ogni parte della membrana basilare è sensibile ad un diverso intervallo di frequenze, al punto che si è fatta l'ipotesi che essa possa essere assimilata ad un banco di filtri. Per determinare le caratteristiche di questo banco di filtri uno dei primi esperimenti realizzati è quello di Fletcher, il quale valutò la risposta dell'orecchio ad un tono puro in presenza di rumore bianco a banda limitata<sup>1</sup> centrato sulla stessa frequenza del tono puro.

Il livello del tono puro viene inizialmente fissato in modo da essere ben udibile da un orecchio normale. Successivamente, lasciando invariato il livello del rumore bianco, il livello del tono puro viene diminuito di 5 dB alla volta fino a che l'ascoltatore non riesce più a percepirlo. Il numero di passaggi necessari a rendere il suono inaudibile viene registrato perché definisce la "soglia" al di sotto della quale l'orecchio non è più in grado di distinguere il tono puro all'interno del rumore bianco. Successivamente l'esperimento viene ripetuto, riducendo di volta in volta l'ampiezza della banda del rumore bianco, lasciando però invariata la densità di potenza spettrale.

Quello che si osserva è che, malgrado l'energia complessivamente associata al rumore si vada progressivamente riducendo, non si osserva nessuna variazione nella "soglia" fintanto che l'ampiezza della banda del rumore non scende al di sotto di un certo *valore critico*. Oltrepassato tale valore il tono puro diventa invece udibile a livelli sempre più bassi man mano che l'ampiezza di banda del rumore bianco si riduce.

L'esperimento può poi essere ripetuto con toni di diversa frequenza andando a definire l'ampiezza delle bande critiche relativamente all'intero spettro delle frequenze udibili.

La conclusione degli esperimenti di Fletcher è che nell'ascolto di un tono di una data frequenza l'ascoltatore applica un filtro psicologico la cui larghezza di banda è approssimativamente quella del valore critico trovato. Questo filtro ignora qualsiasi segnale si trovi al di fuori della banda in esame. Conseguentemente la

<sup>1</sup> Per "rumore bianco" si intende un rumore avente una densità di potenza spettrale costante al variare della frequenza, pertanto maggiore sarà l'ampiezza della banda, maggiore sarà l'energia complessivamente associata al rumore in esame. Se  $l$  è il livello di densità di potenza spettrale e  $\Delta f$  è la larghezza di banda del rumore, il livello di pressione complessivo  $L$  è dato da:

$$L = [l + 10 \log \Delta f] \text{ (dB)}.$$

decisione sulla presenza o assenza del tono si basa solamente sul rapporto segnale/rumore (S/R) *all'interno della banda*. La Figura 5 schematizza il rapporto S/R apparente ed effettivo per questo tipo di esperimento. Si vede che al crescere della larghezza di banda del rumore il rapporto S/R prima cresce per poi rimanere costante. Il gomito della spezzata individua quindi la larghezza di banda critica oltre la quale il rapporto S/R apparente rimane invariato, per effetto del “filtro psicologico”, anche se quello effettivo continua a diminuire.

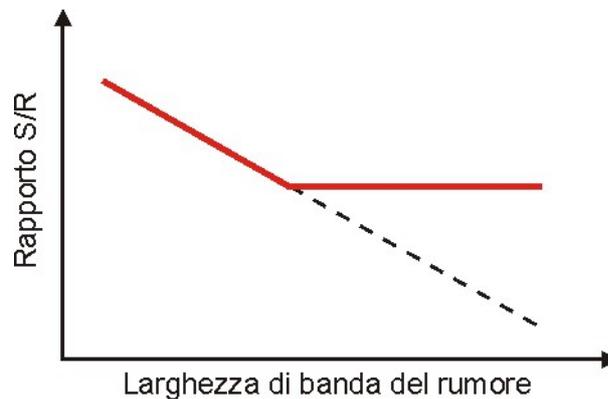


Figura 5 – Esperimento di Fletcher sulla banda critica. La linea continua rappresenta il rapporto segnale/rumore apparente del filtro psicologico; la linea tratteggiata quello effettivo dello stimolo

#### 2.4.2 Il concetto di banda critica

Alla luce di quanto detto in precedenza è quindi possibile definire la *banda critica* relativa ad un dato tono puro come *l'ampiezza di un filtro ideale che blocca le informazioni estranee che possono interferire con la individuazione di quel tono*.

I segnali che invece rientrano nella banda critica vengono “integrati” dall'orecchio, per cui due rumori a banda limitata aventi una diversa larghezza di banda (compresa comunque entro quella critica), ma una densità di potenza spettrale adattata in modo da avere la stessa potenza complessiva, danno luogo alla stessa sensazione di intensità soggettiva.

Dal punto di vista ingegneristico l'aspetto più interessante delle studio delle bande critiche è legato all'osservazione che la loro ampiezza risulta crescente al crescere della frequenza centrale (Figura 6). In particolare fino a 500 Hz si può ritenere che l'ampiezza delle bande sia costante e pari a 100 Hz, mentre per frequenze superiori a 500 Hz si può ritenere con buona approssimazione che l'ampiezza delle bande critiche sia pari al 20% della frequenza centrale.

Tenendo conto di ciò è possibile suddividere lo spettro delle frequenze udibili in bande critiche adiacenti, in modo tale che il limite superiore della banda critica inferiore corrisponda al limite inferiore della banda critica superiore adiacente. Così facendo, e tenendo conto della ampiezza crescente delle bande, lo spettro da 0 a 16 kHz può essere suddiviso in 24 bande critiche individuate univocamente da un indice numerico (Tabella 1). L'insieme di questi indici numerici definisce

una nuova scala per la valutazione della frequenza, che può così essere espressa in base all'indice di banda critica che si misura in *Bark*.

La corrispondenza fra la frequenza  $f$  e il corrispondente indice di banda critica  $z$  è esprimibile mediante le seguenti relazioni:

$$z = \begin{cases} f/100, & f < 500 \text{ Hz} \\ 9 + 4 \log_2(f/1000), & f > 500 \text{ Hz} \end{cases} \quad (2)$$

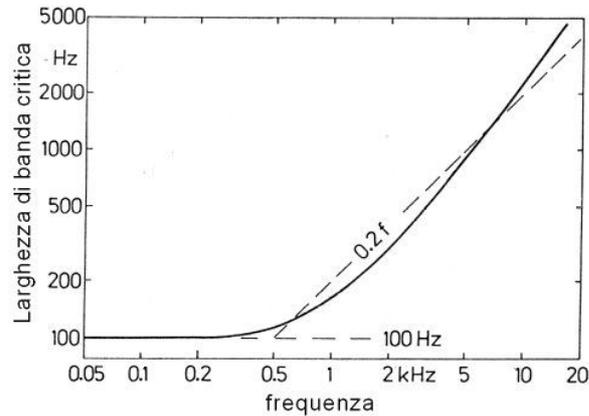


Figura 6 – Larghezza delle bande critiche in funzione della frequenza. Le rette tratteggiate definiscono le approssimazioni per le basse ed alte frequenze. (figura tratta da Rif.[1])

Tabella 1 – Indici di banda critica  $z$ , limiti di frequenza inferiori ( $f_i$ ) e superiori ( $f_u$ ), e ampiezza ( $\Delta f_G$ ) delle bande critiche centrate in  $f_c$ . (da Rif. [1])

$z$	$f_i, f_u$	$f_c$	$z$	$\Delta f_G$	$z$	$f_i, f_u$	$f_c$	$z$	$\Delta f_G$
Bark	Hz	Hz	Bark	Hz	Bark	Hz	Hz	Bark	Hz
0	0	50	0.5	100	12	1720	1850	12.5	280
1	100	150	1.5	100	13	2000	2150	13.5	320
2	200	250	2.5	100	14	2320	2500	14.5	380
3	300	350	3.5	100	15	2700	2900	15.5	450
4	400	450	4.5	110	16	3150	3400	16.5	550
5	510	570	5.5	120	17	3700	4000	17.5	700
6	630	700	6.5	140	18	4400	4800	18.5	900
7	770	840	7.5	150	19	5300	5800	19.5	1100
8	920	1000	8.5	160	20	6400	7000	20.5	1300
9	1080	1170	9.5	190	21	7700	8500	21.5	1800
10	1270	1370	10.5	210	22	9500	10500	22.5	2500
11	1480	1600	11.5	240	23	12000	13500	23.5	3500
12	1720	1850	12.5	280	24	15500			

## 2.5 Mascheramento

Parlando delle bande critiche si è visto che un rumore sovrapposto ad un tono puro nella sua stessa regione spettrale può rendere inaudibile il tono puro se il livello di quest'ultimo non è abbastanza alto. Questo effetto prende il nome di *mascheramento* e si manifesta non solo per effetto di rumori a banda più o meno larga, ma anche per effetto di altri toni puri o complessi.

*Il mascheramento gioca un ruolo molto importante nella vita quotidiana, ed interviene in numerose situazioni. Ad esempio un conversazione che avviene per strada può essere resa incomprensibile dal passaggio di un camion molto rumoroso. In questo caso il rumore del camion maschera il parlato e per potersi nuovamente capire è necessario elevare il tono della voce. Analogamente è esperienza comune che l'ascolto della radio in macchina può avvenire a volume relativamente basso quando l'auto è ferma o si muove a bassa velocità, mentre richiede un volume sempre più elevato quando si muove ad alta velocità ed il rumore prodotto dalle ruote aumenta. Ma il mascheramento non è dovuto solo alla presenza di un rumore: in una orchestra il suono di uno strumento può essere mascherato da quello degli altri strumenti se il suo livello non è abbastanza elevato o se la nota suonata si trova nella stessa regione spettrale (cioè nella stessa banda critica) della nota suonata dagli altri.*

Nello studio del mascheramento assume una grande importanza la *soglia di mascheramento*, cioè il livello sonoro che un *segnale campione* (generalmente un tono puro) deve avere per poter essere udibile in presenza di un *suono mascherante* che può essere a sua volta un tono puro o un rumore a banda più o meno larga.

### 2.5.1 Mascheramento da rumore a banda larga

Un rumore bianco ad ampia banda utilizzato come segnale mascherante produce l'effetto di innalzare la soglia di udibilità del segnale campione rispetto alla situazione in quiete (Figura 7). Benché il rumore bianco abbia una densità di potenza spettrale indipendente dalla frequenza si osserva che la soglia di mascheramento è orizzontale solo alle basse frequenze (con un livello di circa 17 dB più elevato rispetto al livello di densità spettrale), mentre al di sopra dei 500 Hz la soglia di mascheramento ha una pendenza di circa 10 dB per decade. Inoltre, incrementando il livello di densità spettrale del rumore bianco di 10 dB si osserva uno spostamento della soglia di mascheramento di altrettanti dB verso l'alto, mostrando che il mascheramento da rumore bianco a banda larga ha un andamento di tipo lineare. Per frequenze molto basse o molto alte l'andamento della soglia di mascheramento coincide con quella della soglia in assenza di mascheramento.

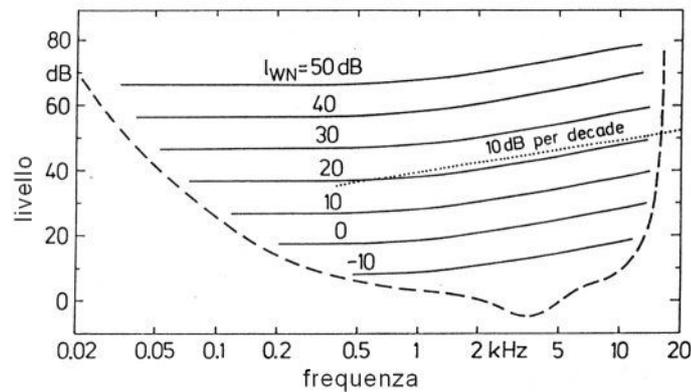


Figura 7 – Soglie di mascheramento da un rumore bianco di livello di densità  $l_{WN}$  in funzione della frequenza del segnale campione. La curva tratteggiata indica la soglia di udibilità in assenza di segnale mascherante. (figura tratta da Rif. [1])

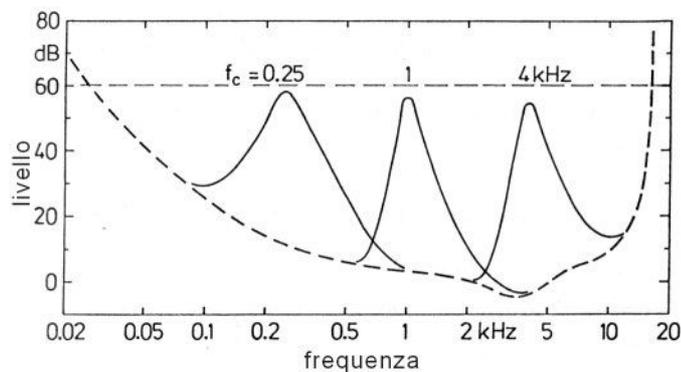


Figura 8 – Soglie di mascheramento da rumore a banda stretta con un livello di 60 dB e frequenze centrali di 0.25, 1 e 4 kHz. La curva tratteggiata è la soglia in assenza di segnale mascherante. (figura tratta da Rif. [1])

### 2.5.2 Mascheramento da rumore a banda stretta

Per rumore a banda stretta si intende, in questa parte, un rumore la cui larghezza di banda è uguale o inferiore alla larghezza di banda critica.

La Figura 8 mostra le soglie di mascheramento dovute a tre rumori a banda stretta centrati sulle frequenze di 250, 1000 e 4000 Hz, con larghezza di banda rispettivamente di 100, 160 e 700 Hz, e livello complessivo di 60 dB. Si osserva che l'andamento delle curve di mascheramento a 1 e 4 kHz sono molto simili, mentre la curva a 250 Hz denota un mascheramento esteso ad uno spettro più ampio. L'altro aspetto interessante è che il picco della soglia di mascheramento tende a decrescere verso le alte frequenze: la differenza rispetto alla linea di riferimento a 60 dB è rispettivamente di 2, 3 e 5 dB.

Analizzando l'andamento della soglia di mascheramento in funzione del livello del segnale mascherante si osserva l'andamento rappresentato in Figura 9. La soglia al disotto della frequenza centrale cresce al crescere del livello ma il passaggio dalle basse alle alte frequenze avviene con una pendenza che appare invece indipendente dal livello del rumore mascherante. Il picco della soglia di mascheramento è inferiore di 3 dB rispetto al livello del suono mascherante. Al di

sopra della frequenza centrale la soglia diminuisce abbastanza rapidamente per livelli medio-bassi, mentre decresce più lentamente quando il livello del segnale mascherante è più elevato. Pertanto l'andamento della soglia di mascheramento in funzione della frequenza dipende dal livello del segnale mascherante.

### 2.5.3 Mascheramento da toni puri

Lo studio del mascheramento da toni puri presenta notevoli difficoltà dal punto di vista sperimentale, per via di fenomeni di interferenza che si verificano fra il segnale di prova ed il segnale mascherante. L'andamento risultante della soglia di mascheramento in funzione del diverso livello del segnale mascherante è raffigurato in Figura 10. Appare evidente che, contrariamente a quanto visto per il rumore a banda stretta, l'andamento della soglia al disotto della frequenza di prova dipende dal livello del segnale: in particolare mostra una pendenza meno accentuata man mano che il livello del segnale mascherante decresce. Al disopra della frequenza in esame la soglia di mascheramento mostra un andamento simile a quello osservato nel caso del rumore a banda stretta, con la pendenza che decresce al crescere del livello del segnale.

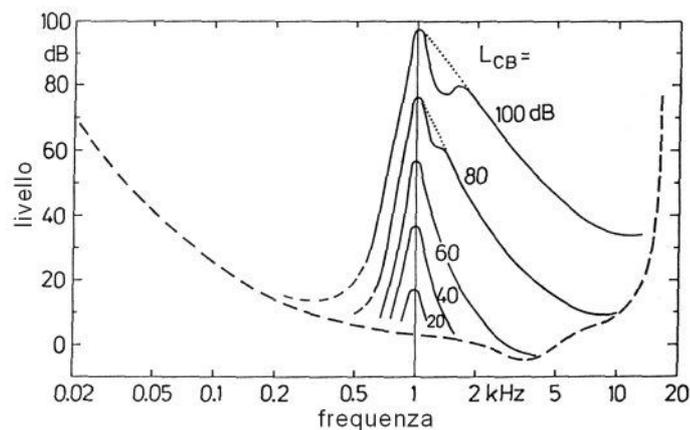


Figura 9 – Soglie di mascheramento da rumore a banda stretta con frequenza centrale di 1 kHz e differenti livelli totali. (figura tratta da Rif. [1])

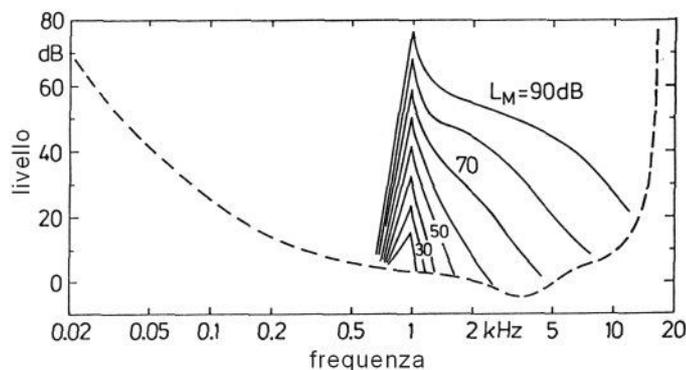


Figura 10 – Soglia di mascheramento da tono puro ad 1 kHz di diverso livello. L'andamento della curva in prossimità di 1 kHz è stimato. (figura tratta da Rif. [1])

## Bibliografia

- [1] B. Gold, N. Morgan, *Speech and audio signal processing*, Wiley & Sons, New York, 2000.
- [2] D.E. Hall, *Musical Acoustics 2nd edition*, ITP, Belmont-California, 1990.
- [3] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics – Facts and models*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.

## Webliografia

- [4] Mascheramento e compressione audio:  
<http://www.cs.sfu.ca/CourseCentral/365/li/material/notes/Chap4/Chap4.4/Chap4.4.html>
- [5] Human perception of sound:  
<http://www-users.york.ac.uk/~acd114/pitch/pitch.htm>
- [6] Psicoacustica ed MP3:  
<http://www.dcs.warwick.ac.uk/~matthewr/1stYearReport/node5.html>