




# **ANALISI DELLE MIGLIORI PRATICHE E TECNOLOGIE DISPONIBILI NEI SETTORI DELLA MISURAZIONE E REGISTRAZIONE DEL RUMORE E IN QUELLO DELLA PSICOACUSTICA**

**Introduzione alla psicoacustica e ai possibili campi di impiego  
nell'acustica ambientale**

**Marzo 2013**

Hanno contribuito alla realizzazione del presente lavoro:

|   |   |
|---|---|
|  | PROVINCIA DI TORINO<br>Area Risorse Idriche e Qualità dell'Aria |
| Responsabile  | Francesco Pavone  |
| Collaboratore   | Nicola Vozza  |

|   |   |
|---|---|
|  | ARPA PIEMONTE<br>Dipartimento Provinciale di Torino |
| Responsabile  | Antonella Pannocchia                                |
| Coordinatore tecnico  | Jacopo Fogola                                       |
| Collaboratori   | Daniele Grasso                                      |
|   | Danilo Corgnati                                     |

## **1 PREMESSA**

Il presente documento, elaborato nell'ambito della convenzione con la Provincia di Torino "*Analisi delle migliori pratiche e tecnologie disponibili nei settori della misurazione e registrazione del rumore e in quello della psicoacustica*", costituisce una descrizione introduttiva ai concetti della psicoacustica e ai suoi possibili campi di impiego nell'acustica ambientale.

Nella prima parte verranno illustrati alcuni concetti generali sulla psicofisiologia delle sensazioni ed i fondamenti della psicoacustica.

Successivamente saranno descritti i vari modelli e parametri utilizzati nelle valutazioni soggettive mediante test di ascolto.

Infine saranno proposti alcuni esempi di applicazioni della psicoacustica in campo ambientale.

Il lavoro svolto è il frutto di una ricerca di vari contributi reperibili in letteratura ed in particolare i capitoli dal 6 al 9 traggono spunto (alcuni paragrafi sono testualmente tradotti) dall'attuale testo di riferimento sull'argomento: "Psychoacoustic: Facts and Models" di H. Fastl ed E. Zwicker [1] e dal saggio reperibile in rete "Psychoacoustics and Sound Quality" di H. Fastl [2].

## **2 PSICOFISIOLOGIA DELLE SENSAZIONI**

La nostra realtà sensoriale non corrisponde in tutto alla realtà fisica, ma ne rappresenta una selezione specie-specifica. Partendo dalla distinzione fra stimolo distale<sup>1</sup> e stimolo prossimale<sup>2</sup>, si può affermare che ogni specie possiede un proprio registro sensoriale. Un secondo aspetto è che ogni stimolazione fisica può tradursi in una risposta bioelettrica a patto che l'organismo disponga dei recettori adatti allo scopo: se ne deduce che alcuni stimoli ambientali (come ad esempio i campi magnetici per l'uomo) non sono oggetto di sensazione da parte della specie che non possiede i recettori idonei. Inoltre ogni

---

<sup>1</sup> L'energia fisica inviata da uno stimolo ambientale al recettore

<sup>2</sup> La porzione dell'energia fisica acquisibile e interpretabile dai nostri recettori sensoriali

specie, all'interno del particolare registro sensoriale di cui dispone, tende a privilegiare alcuni sensi: l'uomo, ad esempio, tende a privilegiare le modalità sensoriali che gli permettono un'esperienza globale e sintetica del mondo che non presupponga un contatto diretto: ecco perché la vista e l'udito sono i registri più utilizzati.

## **2.1 Le basi sensoriali**

Si definisce stimolo sensoriale ogni tipo di energia o evento fisico che sia in grado di indurre una risposta a livello di recettori.

La branca che studia la relazione fra stimoli fisici e stimoli sensoriali si chiama psicofisica (anche se attualmente si preferisce psicofisiologia della sensazione). Fra i concetti più importanti in proposito troviamo i seguenti:

- **soglia percettiva:** è la soglia di percezione al di sotto della quale uno stimolo sensoriale non viene avvertito. Non rappresenta una quantità discreta, ma un punto variabile. Si definisce per convenzione soglia percettiva la quantità di energia minima in grado di produrre una sensazione nel 50% delle stimolazioni. Le prove utilizzate possono essere sia discendenti (cioè da un valore soprasoliare dell'intensità dello stimolo, via via scendendo), sia ascendenti (viceversa). La variabilità della soglia è spiegata dalla "teoria delle detezone del segnale": secondo questa teoria anche quando non c'è stimolazione, il recettore non è completamente silente, ma mantiene sempre un certo grado di attività che forma il cosiddetto "rumore di fondo". Tale rumore è variabile, e di conseguenza è variabile anche la soglia percettiva, la quale viene misurata come differenza fra la media del rumore di fondo e la media del rumore di fondo più lo stimolo;
- **soglia differenziale:** è la più piccola differenza discriminabile tra due stimoli. Essa non è una quantità definita, ma rappresenta una proporzione fissa dello stimolo standard, secondo la legge di Weber-Fechner;
- **Legge di Weber-Fechner:** fenomeno secondo il quale la variazione di uno stimolo è percepita in misura minore quando l'intensità di partenza di tale stimolo è elevata (in altre parole, aggiungere 1 kg ad un oggetto il cui peso è di 5 kg risulta essere percepito in maniera differente rispetto ad aggiungere 1 kg ad un oggetto il cui peso è di 30 kg). Tale fenomeno può essere descritto attraverso la seguente equazione differenziale:

$$dp = k \frac{dS}{S}$$

dove  $S$  è l'intensità dello stimolo,  $k$  è un parametro dipendente dall'unità di misura dello stimolo e  $p$  è l'intensità dello stimolo effettivamente percepita. La legge di Weber-Fechner si scrive come:

$$p = k \ln S$$

Il tatto è il senso che ha la maggiore capacità discriminativa, mentre l'olfatto e il gusto la minore. La vista ha una discreta capacità di discriminare la luce, ma una buona capacità di discriminare il colore. Inoltre è importante sottolineare che il gusto e l'olfatto migliorano la loro soglia differenziale con l'esercizio, a differenza della vista e dell'udito che (nella specie umana) restano sostanzialmente inalterati, partendo già da un buon livello. Nei cani accade il contrario, è l'olfatto il senso migliore, e non solo perché il loro apparato è fisicamente migliore, ma anche perché tale senso è utilizzato maggiormente sin dalla nascita;

- **dimensione dello stimolo:** per ogni tipo di stimolo fisico esiste una relazione fra un aumento delle dimensioni effettive dello stimolo fisico distale e la corrispondente sensazione di aumento dello stimolo prossimale percepito. Tale relazione è espressa da un coefficiente che raramente è pari ad 1. Ogni canale sensoriale ha un suo specifico coefficiente.

## 2.2 I recettori sensoriali

Ogni recettore sensoriale è specializzato nell'acquisizione e conduzione di un certo tipo di energia, in assenza della quale, non c'è nessuna risposta da parte di esso. Tuttavia, se un recettore viene esposto ad una forte stimolazione di un'energia che non gli compete (ad esempio nel caso di sfregamento di un occhio o di pressione di un orecchio), quello che arriverà al cervello sarà una stimolazione allucinogena del senso corrispondente (immagini e macchie luminose nel caso dell'occhio, suoni nel caso dell'orecchio). Questo avviene per via della legge dell'energia specifica, la quale stabilisce che il tipo di sensazione non dipende dal tipo di energia in entrata, ma dal tipo di recettore stimolato.

Il percorso di uno stimolo sensoriale è il seguente: il recettore stimolato produce un potenziale di recettore che genera a sua volta un potenziale sinaptico al livello delle

sinapsi che lo collegano coi dendriti del neurone sensoriale; dal dendrite il potenziale si propagherà fino al neurone sensoriale, dove genererà un potenziale d'azione che si propagherà a sua volta fino al sistema nervoso centrale (S.N.C.) lungo l'assone. Lo stimolo viaggia lungo questa via ad una velocità variabile da nervo a nervo, ma che si aggira intorno a 15/20 m/s (meno di un decimo di secondo per muoversi dal punto più lontano del corpo al cervello); queste alte velocità sono possibili grazie alla sistematica presenza lungo il nervo dei nodi di Ranvier, zone in cui lo strato di mielina è più sottile. Se la velocità di trasmissione al cervello rallenta o se lo stimolo varia troppo rapidamente, l'immagine sensoriale non aderisce più alla realtà fisica (come quando un suono intermittente rapidissimo sembra un suono unico).

E' importante ricordare in proposito che l'esperienza sensoriale ha origine nelle corrispondenti aree corticali deputate all'elaborazione di ogni specifico stimolo e non a livello dei singoli recettori, i quali hanno esclusivamente il compito di tradurre l'energia fisica in energia bioelettrica comprensibile dal S.N.C..

Se il neurone dà una risposta di tipo tutto o nulla, come si determinano le altre caratteristiche dello stimolo?

L'intensità dello stimolo è data dalla frequenza di scarica del neurone e dal numero di neuroni contemporaneamente attivati. Altre caratteristiche specifiche come il timbro di un suono, l'orientamento di una linea nello spazio, la sfumatura cromatica, sono dedotte dall'attivazione di particolari cellule nervose specializzate.

## **2.3 L'udito**

L'orecchio è divisibile anatomicamente e funzionalmente in tre parti:

1) Orecchio esterno: costituito dal padiglione auricolare e dal condotto auricolare; quest'ultimo, lungo circa 25 millimetri, termina con la membrana timpanica, una membrana a forma di cono molto schiacciato con l'apice rivolto verso l'orecchio medio. La sua funzione è incanalare i suoni, e per questo in molte specie i padiglioni sono più grandi ed orientabili.

2) Orecchio medio: cavità scavata in buona parte all'interno dell'osso temporale. Sulla sua parete laterale è delimitato dal timpano, sulla parete mediale da due finestre chiuse da una membrana, la finestra ovale e la rotonda. Al centro sono posti tre ossicini: il martello (che poggia sulla membrana timpanica), l'incudine (che lo collega con la staffa), e la staffa

(che poggia direttamente sulla membrana della finestra ovale); visto che il timpano è circa 20 volte più grande del piede della staffa, e visto che l'articolazione degli ossicini dà un vantaggio meccanico, il suono giunge agli organi sensori amplificato di circa 20/30 volte. Sempre dall'orecchio medio parte la Tuba di Eustachio, che ha il compito di collegare l'orecchio medio con la gola e quindi con l'esterno, per eguagliare la pressione (la tuba è normalmente chiusa e si apre con la deglutizione; ecco perché i soldati ingoiano quando fanno esplodere le bombe). Gli ossicini sono poi regolati da due muscoli antagonisti, il tensore e lo stapedio, che hanno la medesima funzione protettiva. La funzione dell'orecchio medio è trasmettere e potenziare il segnale fisico.

3) Orecchio interno (o labirinto): una parte dell'orecchio interno è costituita dall'apparato vestibolare (sacculo, utricolo e canali semicircolari) deputato al controllo dell'equilibrio. L'altra parte è invece costituita dalla coclea ossea, una spirale che parte dalle finestre ovale e rotonda e, dopo 2 giri e 3/4 finisce. La coclea è suddivisa al suo interno da due membrane in 3 parti longitudinali, la scala vestibolare (in alto), il dotto coclearie (nel mezzo), e la scala timpanica (in basso). Il canale mediano termina a culo di sacco, mentre la scala vestibolare e quella timpanica entrano in comunicazione in corrispondenza del vertice della coclea attraverso un minuscolo foro detto helicotrema. All'interno del dotto coclearie, poste sulla membrana basale che ne costituisce il pavimento, troviamo le cellule ciliate del Corti, che strusciano sulla membrana tettoria (che rappresenta il tetto del condotto coclearie) ad ogni movimento della membrana basilare. Da queste cellule partono circa 30.000 fibre del nervo uditivo in corrispondenza del modiolo (il corpo centrale della coclea ossea). L'onda sonora incanalata dall'orecchio esterno viene quindi amplificata dal sistema di ossicini dell'orecchio medio, provoca la deformazione della membrana della finestra ovale che a sua volta mette in movimento l'endolinfa, di cui la coclea, immersa nella perilinfia, è riempita, che passa per il canale vestibolare e, attraverso l'helicotrema, arriva nel canale timpanico dove, deformando la membrana basale, fa strusciare le ciglia delle cellule del Corti sulla membrana tettoria e fa sì che le rispettive cellule generino un potenziale d'azione che si propagherà lungo il nervo acustico. I recettori all'interno della coclea hanno una disposizione tonotopica, con i recettori per i suoni più acuti all'interno del primo giro della coclea (quello vicino alla finestra ovale) fino a quelli più gravi che si trovano negli ultimi tre quarti di giro. Gli assoni dei recettori vanno su altri neuroni all'interno del nucleo coclearie, da qui arrivano al

complesso olivare e, dopo un passaggio presso altri due nuclei nella formazione reticolare, arrivano sulla corteccia uditiva all'interno del lobo temporale. Anche qui viene conservata l'organizzazione tonotopica.

A livello di sensazione, la frequenza di un'onda sonora si traduce nella rispettiva percezione della qualità tonale (ossia l'altezza del suono), mentre l'ampiezza dell'onda si traduce nella sua intensità. Anche per l'udito vale la legge di Weber sulla soglia assoluta, e bisogna inoltre sottolineare che nell'udito l'altezza del suono viene conservata a prescindere dalla distanza (come fa la vista per il colore), mentre l'intensità del suono è funzione della distanza (come fa la vista per la luminosità, che cala distanziandosi dalla sorgente luminosa).

## **2.4 La percezione uditiva**

Per la percezione uditiva assume una importanza cruciale il tempo, perché è grazie ad esso (e al fatto che c'è una sensazione binaurale) che riusciamo a localizzare la fonte sonora e apprezzare le caratteristiche del suono come le qualità ritmiche o quelle armoniche.

Inoltre, anche per la percezione uditiva esisterebbero dei vincoli imposti dalla struttura percettiva che fanno sì che alcune configurazioni musicali (melodiche, ritmiche, armoniche e timbriche) siano più facilmente fruibili; è qui che probabilmente risiede il motivo delle numerose analogie riscontrabili nelle filastrocche per bambini, molto simili anche fra contesti culturali disparati.

Riguardo alla sensazione binaurale, essa viene interpretata sia in termini di scarto temporale fra le due orecchie, sia in funzione delle differenze timbriche fra il suono che arriva ad un orecchio e quello che arriva all'altro, causate dall'azione filtrante svolta dalla testa. E' per recuperare questa disparità binaurale che quando la fonte sonora è frontale o posteriore muoviamo la testa porgendo un orecchio più vicino alla fonte rispetto all'altro.



### **3 CONSIDERAZIONI GENERALI SULLA PSICOACUSTICA**

La psicoacustica rappresenta una branca della psicofisiologia della sensazione.

Il suo sviluppo è stato incoraggiato prevalentemente nel campo industriale, per la riduzione del rumore all'interno dei veicoli, negli elettrodomestici o nei sistemi di telecomunicazioni e più in generale nel cosiddetto settore della qualità sonora (sound-quality).

L'applicazione dei principi della psicoacustica all'ingegneria sonora e al sound-quality design è stata però solo di recente accettata come un utile strumento di progettazione. Sebbene una solida base di conoscenze fosse disponibile da un certo tempo, le applicazioni della psicoacustica alla valutazione del rumore e del product-sound erano solitamente piuttosto scarse in passato.

Soltanto da un decennio, o poco più, le applicazioni delle conoscenze derivate dalla psicoacustica, o anche dall'acustica musicale, sono notevolmente aumentate. Tra i fattori rilevanti che hanno determinato questa crescita è sicuramente da evidenziare l'aspetto economico: in un mercato globale, con molti prodotti concorrenti caratterizzati da funzionalità simili, il suono può diventare una caratteristica vincente. Dalla qualità acustica di un prodotto l'utente può estrapolare la qualità del prodotto intero, più o meno consapevolmente. È pertanto facile prevedere che l'applicazione della psicoacustica nella valutazione della qualità del suono e nel sound-design aumenterà ulteriormente.

In campo scientifico la psicoacustica ha origini che risalgono ad oltre 2500 anni or sono.

Già intorno al 500 a.C. il filosofo greco Pitagora, con la sua arpa monocorde, aveva condotto i primi esperimenti di tipo psicoacustico, studiando la consonanza e la dissonanza musicale.

Per Pitagora la grandezza fisica di riferimento era la lunghezza della corda tesa lungo il suo strumento e sostenuta da un ponte. Variando la posizione del ponte e pizzicando entrambe le estremità della corda valutava con l'udito se l'intervallo musicale risultante era consonante o dissonante, scoprendo che i semplici rapporti delle divisioni di stringa – come 1:2, ovvero l'ottava, 2:3, la quinta, e 3:4, la quarta - erano percepiti come intervalli musicali consonanti.

Nella moderna psicoacustica le procedure applicate sono simili a quelle utilizzate da Pitagora. In un primo momento sono prodotti stimoli acustici, ovvero fisici, generalmente con l'aiuto di sofisticate tecniche digitali e algoritmi di elaborazione del segnale. Successivamente alla conversione D/A (digital analog) i segnali risultanti vengono presentati ai soggetti tramite cuffie o altoparlanti. I soggetti, quindi, sono invitati a giudicare gli attributi dei suoni percepiti, quali l'altezza, il volume o il tono. In questo modo negli anni sono stati creati modelli dei parametri psicoacustici quali la loudness, la sharpness, la roughness, la fluctuation strength, il relative approach, ecc.

Gli stessi principi sono spesso applicati nell'ingegneria del suono, tuttavia, in una sequenza invertita.

Durante estesi studi psicoacustici viene definito un particolare suono, ottimale per un determinato prodotto, un cosiddetto suono target.

E' poi compito degli ingegneri che lavorano al prodotto intervenire sulle caratteristiche fisiche della generazione del suono in modo da giungere ad un risultato che si avvicini il più possibile al suono target precedentemente definito.

### **3.1 Psicoacustica in campo ambientale**

Di recente molti studiosi hanno iniziato ad applicare i concetti principali della sound-quality in campo ambientale e prettamente negli studi sui soundscapes, con il tentativo di dare delle risposte oggettive e di carattere scientifico ai concetti introdotti da M. Schafer a partire dagli anni '70.

Se le persone si lamentano e sono infastidite dal rumore, i motivi reali che portano a tali comportamenti dovrebbero essere investigati.

Gli aspetti fisici del segnale, gli aspetti psicoacustici, binaurali nonché gli aspetti cognitivi possono alterare la valutazione dell'ambiente sonoro (Figura 1).

Domande rilevanti possono essere:

- Quale parte della fonte sonora provoca il fastidio da rumore?
- Quali sono i tipi di segnale che creano il fastidio?
- È la struttura temporale responsabile per i reclami?
- Il carattere informativo è rilevante ai fini del fastidio?
- Che tipo di atteggiamento e di attesa ha l'ascoltatore?

Le risposte a queste domande possono già dare informazioni significative sulle cause reali per i reclami.

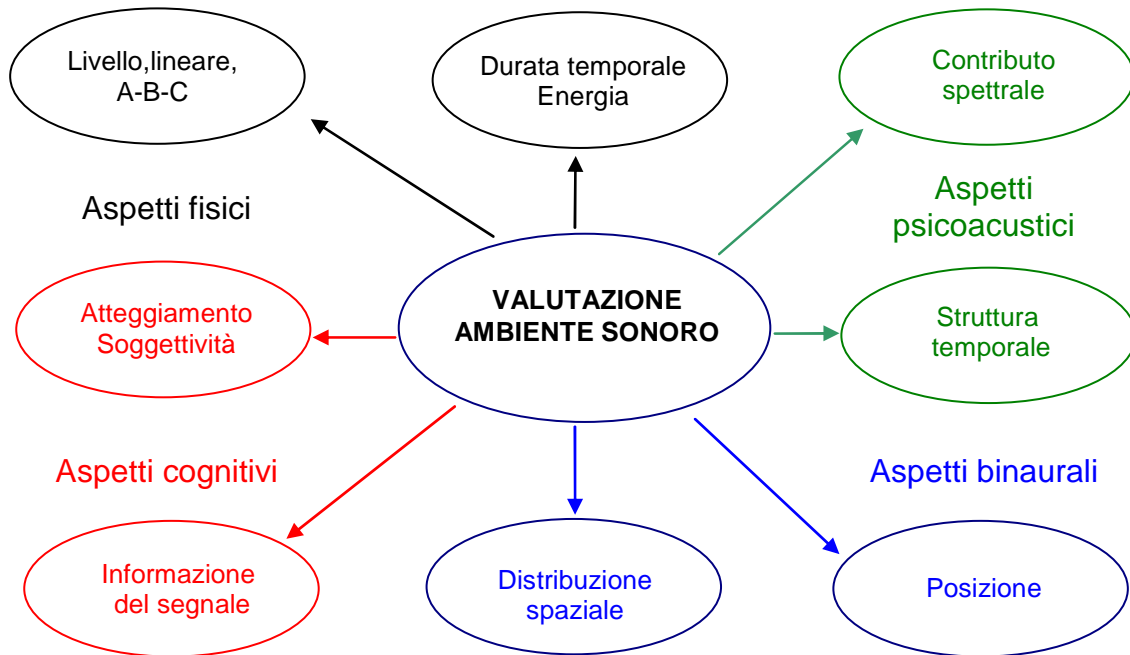


Figura 1: vari aspetti alla valutazione della qualità di un ambiente sonoro

In campo ambientale negli ultimi anni vi è stata una notevole spinta all'utilizzo di tali metodologie per la valutazione del soundscape.

Vengono dapprima svolte registrazioni ambientali con tecnica binaurale, quindi i suoni vengono analizzati e oltre ai livelli di pressione sonora vengono restituiti i parametri psicoacustici.

Successivamente i suoni vengono presentati a un campione di soggetti i quali esprimono delle valutazioni soggettive.

Infine si ricercano delle relazioni tra i parametri psicoacustici e le valutazioni soggettive.

## **4 MODELLAZIONE DELLE GRANDEZZE PSICOACUSTICHE**

Le principali grandezze che caratterizzano i suoni dal punto di vista fisico sono: pressione e intensità sonora, spettro di frequenza, forma d'onda, ecc.

Nell'affrontare l'aspetto percettivo, che è l'oggetto di studio della psicoacustica, è richiesta, tuttavia, la definizione di nuove grandezze, attraverso le quali poter quantificare gli attributi soggettivi di un suono.

Le caratteristiche soggettive fondamentali di un suono sono:

- la sensazione sonora (loudness): esprime il "volume" di un suono ed è identificata nel linguaggio corrente con espressioni quali "suono debole" o "suono forte"; è correlata con il contenuto energetico del suono;
- l'altezza tonale (pitch): permette di distinguere un suono grave da un suono acuto (nella musica si identifica con una nota sulla scala musicale) ed è in relazione con le frequenze predominanti nel suo spettro;
- il timbro (timbre): attributo qualitativo del suono che permette di distinguere, ad esempio, una medesima nota suonata da strumenti diversi; è legato prevalentemente alla forma d'onda e all'evoluzione temporale del segnale acustico.

Nell'ingegneria della qualità del suono rivestono un ruolo importante, oltre alla loudness, le seguenti grandezze psicoacustiche: la nitidezza (sharpness), la ruvidità (roughness), la fluttuazione (fluctuation strength), l'approccio relativo (relative approach).

Considerato che la valutazione di tali grandezze tramite esperimenti di psicoacustica può richiedere molto tempo, sono stati proposti modelli che ne simulano il comportamento. Questi modelli possono essere utilizzati per fornire stime dell'entità di tali grandezze a partire da dati fisici.

### **4.1 Loudness**

La loudness è la sensazione percepita dell'intensità sonora.

Fletcher introdusse un criterio di valutazione soggettiva basato su un confronto binario di toni puri, uno dei quali, di frequenza fissa pari a 1000 Hz, svolge la funzione di tono di riferimento.

Il criterio si fonda sui seguenti presupposti:

- alla frequenza di 1000 Hz, la scala oggettiva dei livelli sonori L, espressi in dB, e la scala dei livelli soggettivi P, espressi in phon, coincidono (ad es. un tono puro di frequenza 1000 Hz e livello 60 dB ha un livello soggettivo di 60 phon);
- le prove di ascolto permettono di tracciare le curve di uguale livello soggettivo, dette curve isofoniche;
- i risultati sono riassunti in un diagramma, detto audiogramma normale, la cui forma dipende dalle condizioni di ascolto (in cuffia, in campo libero, in campo diffuso, ecc.). In Figura 2 e Figura 3 sono riportati due esempi di audiogramma: nell'ordine, quello originariamente costruito da Fletcher e Munson, valido per ascolto binaurale in cuffia, e quello tratto dalla norma ISOR226, valido per ascolto binaurale in campo libero con sorgente (altoparlante) disposta di fronte all'ascoltatore.

La relazione tra loudness S (espressa in son) e livello soggettivo P (espresso in phon) è stabilita dalla norma ISO-131 [3]:

$$S = 2^{(P-40)/10} \quad [\text{son}]$$

$$P = 40 + 10 \log_2(S) \quad [\text{phon}]$$

Pertanto 1 son esprime la loudness di un tono puro alla frequenza di 1 kHz e livello di pressione acustica 40 dB. In base a quanto precedentemente esposto, risulta inoltre che la dipendenza della loudness dalla pressione acustica è esponenziale: pertanto la loudness raddoppia per un aumento di livello di 10 dB.

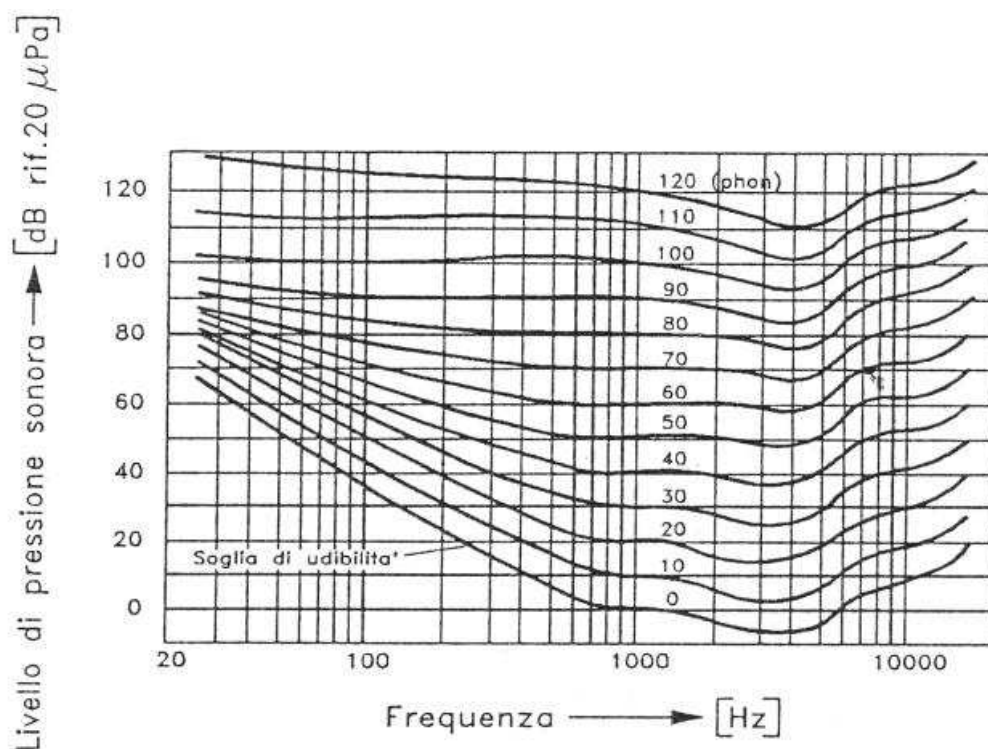


Figura 2: curve isofoniche, ascolto binaurale in cuffia

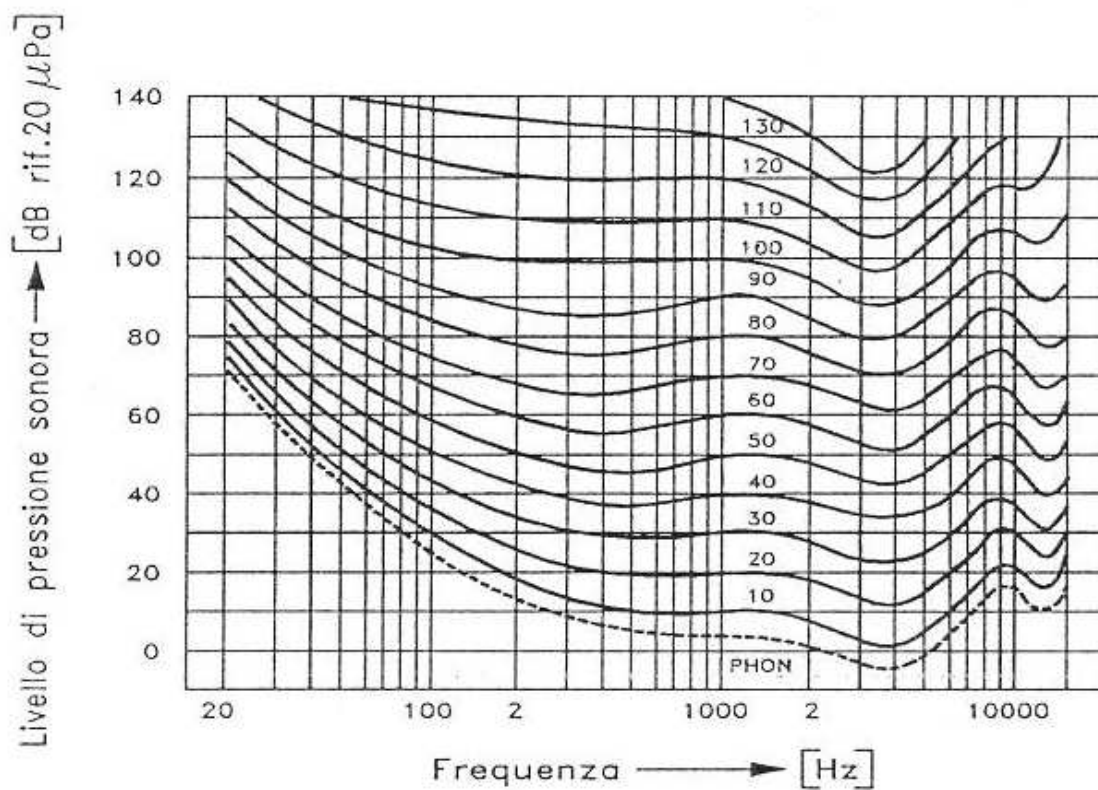


Figura 3: curve isofoniche, ascolto in campo libero

L'intensità soggettiva di suoni complessi non può essere determinata per semplice addizione dei valori, validi per i toni puri, desunti dall'audiogramma normale, a causa del fenomeno del mascheramento.

In estrema sintesi, il mascheramento è il fenomeno per cui la percezione di un determinato segnale acustico risulta più difficoltosa in presenza di suoni estranei che nascondono il segnale che intendiamo ascoltare.

La valutazione della loudness di toni puri ha essenzialmente interesse in quanto passaggio intermedio per valutare la loudness di suoni complessi. Per tale valutazione, la norma ISO-R 532 [4] propone due procedimenti, denominati Metodo A (anche noto come metodo di Stevens) e Metodo B (anche noto come metodo di Zwicker). In questi appunti ci si limiterà ad illustrare il metodo di Stevens, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- le componenti spettrali che cadono all'interno della stessa banda critica<sup>3</sup> si sommano in potenza nei confronti del livello soggettivo (pertanto sommando due contributi di uguale potenza si ottiene un incremento di P pari a + 3 phon);
- le componenti spettrali che cadono in bande critiche diverse si sommano direttamente in termini di loudness (pertanto sommando due contributi di uguale potenza si ottiene un raddoppio di S, che corrisponde ad un incremento di P pari a 10 phon).

Il procedimento fa uso del diagramma sotto riportato e si articola nei seguenti passaggi:

1. si analizza lo spettro del suono per bande di 1/3 di ottava (o di un'ottava);
2. per ciascuna banda  $k$ , si determina dal grafico l'indice di loudness  $S_k$  [son];
3. si sommano i contributi delle varie bande con la seguente formula, che tiene conto del mascheramento:

$$S = S_{\max} + F \left( \sum_{k=1}^N S_k - S_{\max} \right) \quad [\text{son}]$$

dove:

S = loudness del suono complesso [son]

---

<sup>3</sup> Una banda critica è un intervallo di frequenze entro alla quale due toni puri simultanei non possono essere percepiti come distinti. A ciascuna banda critica corrisponde una regione della membrana basilare dell'orecchio lunga circa 1.3 mm.

$S_{max}$  = valore massimo degli N valori di  $S_k$

$F = 0,15$  per bande di 1/3 di ottava

$F = 0,30$  per bande di 1 ottava

$S_k$  = indice di loudness corrispondente alla k-ma banda ( $k = 1 \div N$ )

4. si calcola il livello soggettivo [phon] del suono complesso con la formula:

$$P = 40 + 10 \log_2(S) \text{ [phon]}$$

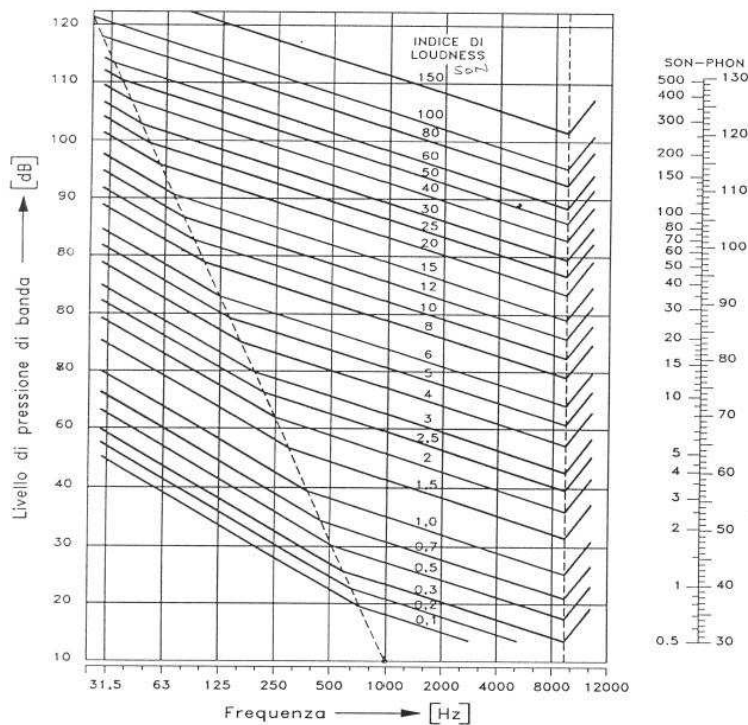


Figura 4: Diagramma per il calcolo della Loudness secondo la ISO 532

## 4.2 Sharpness

Oltre alla sensazione sonora (loudness) una ulteriore grandezza psicoacustica, chiamata "sharpness" ("nitidezza"), riveste un ruolo di primo piano nella qualità del suono.

La sharpness, tra le altre cose, può essere considerata come una misura del colore del tono. Se la giusta quantità di sharpness è aggiunta ad un suono, ad esempio di un prodotto industriale, questo gli darà un carattere di maggior potenza. Tuttavia, troppa sharpness renderà un suono aggressivo.



La sharpness è il valore di sensazione causato dalle alte frequenze di un rumore. L'unità di misura è il "acum" (dal latino "acutezza"). Il valore di 1 acum è attribuito ad un rumore in banda stretta di 1 kHz della larghezza di 150 Hz e del valore di 60 dB. Per i rumori a banda stretta, la nitidezza aumenta al crescere della frequenza centrale e aumenta di un fattore due per un incremento del livello da 30 a 90 dB.

Per scopi pratici di ingegneria del suono, la sharpness, e quindi l'aggressività dei suoni di un particolare prodotto, può essere ridotta aggiungendo componenti in bassa frequenza.

Tuttavia si deve tenere presente che l'aggiunta di componenti in bassa frequenza aumenta anche la sensazione sonora totale. Nondimeno, se la sensazione sonora del suono originale non è troppo alta, la riduzione della sharpness e, quindi, dell'aggressività può sovracompensare l'aumento della sensazione sonora con i suoi effetti sulla qualità del suono complessiva.

### **4.3 Roughness**

La "roughness" è una ulteriore grandezza psicoacustica utilizzata ad esempio per sottolineare le caratteristiche di "sportività" nei suoni prodotti dai motori delle vetture.

E' una sensazione dell'udito che viene creata dalle modifiche relativamente rapide prodotte dalle frequenze di modulazione nella regione tra circa 15 e 300 Hz. Essa raggiunge il suo massimo vicino a frequenze di modulazione di 70 Hz e diminuisce a frequenze più elevate di modulazione. L'unità di misura della roughness è l'"asper" (dal latino "ruvido").

In sostanza, la roughness può essere descritta dal modello di mascheramento temporale dei suoni.

Questa procedura è illustrata in Figura 5: le aree tratteggiate mostrano la variazione temporale di un suono, modulata in ampiezza da un grado di modulazione di circa il 100%, con il livello visualizzato come funzione del tempo. Teoricamente i punti più bassi tra i picchi raggiungono il minimo intorno a  $-\infty$  sulla scala dei decibel. Nelle applicazioni pratiche, tuttavia, il livello minimo è controllato dalla dinamica del sistema uditivo; ad esempio la profondità di modulazione del modello di mascheramento temporale,  $\Delta L$ , raggiunge valori molto più piccoli a causa degli effetti di post-mascheramento, rappresentato dal decadimento dell'eccitazione psicoacustica del sistema uditivo.

Questa variazione limitata del livello è illustrata in Figura 5 dalla curva continua. La distanza temporale dei picchi è inversamente proporzionale alla modulazione di frequenza. In linea di principio, la roughness  $R$  di un suono può essere descritta dal prodotto della profondità di modulazione  $\Delta L$  del modello di mascheramento temporale e dalla frequenza di modulazione  $f_{\text{mod}}$ :

$$R \approx \Delta L \cdot f_{\text{mod}}$$

Poiché questo prodotto è espresso in dB/s, risulta che la sensazione dell'udito per il parametro roughness è proporzionale alla velocità di variazione del modello di mascheramento temporale.

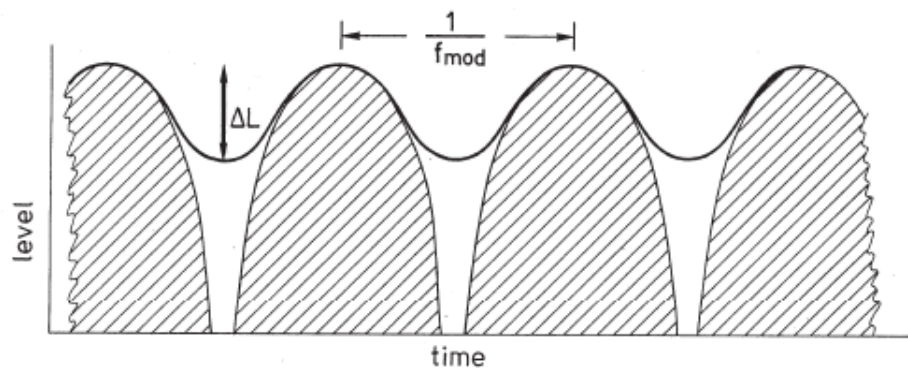


Figura 5: segnale nel modello della roughness

#### 4.4 Fluctuation Strenght

La grandezza psicoacustica "fluctuation strenght" è simile alla roughness. Tuttavia, la fluctuation strenght raggiunge il massimo a frequenze di modulazione di circa 4 Hz.

Il segnale di ingresso nel modello della fluctuation strenght è lo stesso del modello della roughness; in aggiunta alla profondità di modulazione  $\Delta L$  del modello di mascheramento temporale risulta pertinente la frequenza di modulazione  $f_{\text{mod}}$  di 4 Hz.

Pertanto la fluctuation strenght  $F$  può sostanzialmente essere calcolata come segue:

$$F \approx \frac{\Delta L}{\frac{4\text{Hz}}{f_{\text{mod}}} + \frac{f_{\text{mod}}}{4\text{Hz}}}$$

L'unità di misura è il "vacil" (dal latino "vacillare"). La fluctuation strenght gioca un ruolo cruciale nella valutazione del parlato. Infatti anche l'oscillazione dell'inviluppo in un parlato fluente mostra un massimo attorno a una frequenza di modulazione di 4 Hz, corrispondente corrisponde grosso modo alla frequenza delle sillabe pronunciate al secondo.

Come ci si aspetta dalla natura, l'organo vocale umano produce suoni con oscillazioni dell'inviluppo dominanti ad una frequenza a cui l'udito umano è più sensibile.

## **4.5 Relative Approach**

L'orecchio umano reagisce in modo particolarmente sensibile ai rapidi cambi di segnali acustici e alla composizione spettrale, con massimi e minimi ben distinti.

D'altra parte, variazioni di livelli sonori e lenti cambiamenti di frequenza, costanti o lievi, non innescano cambiamenti di sensazioni, dopo l'ascolto, per qualche tempo. Ciò significa che l'udito umano funziona in modo adattativo. Non funziona con valori di misura assoluti, ma giudica le diverse caratteristiche contenute in un suono.

In un confronto A/B effettuato in laboratorio l'udito umano è in grado di rilevare anche piccole differenze tra due suoni.

Nella vita quotidiana, tuttavia, non ci sono paragoni di laboratorio. Al contrario, il nostro orecchio giudica i suoni senza un confronto diretto con un suono di riferimento. Per fare questo l'udito umano non presta molta attenzione ai livelli sonori assoluti, ma si concentra sulle caratteristiche trovate in un suono. Si presume che, al fine di individuare tali caratteristiche, il nostro udito crei una propria serie di riferimenti basati sui suoni ascoltati di recente e successivamente compari i nuovi suoni con questi modelli di riferimento.

Il modello di approccio relativo ("relative approach") è stato sviluppato per riprodurre questo comportamento e per effettuare un'analisi accurata sotto il profilo fonetico. Risulta utile questa analisi per esempio nel caso si voglia valutare il disturbo di singoli passaggi di veicoli, treni, tram, aerei durante la notte. La storia temporale di un evento sporadico in presenza di bassi rumori di fondo, analizzati mediante la tecnica del relative approach può fornire un'utile valutazione della sensazione sonora rispetto alla valutazione di un parametro acustico oggettivo quale il SEL (Sound Exposure Level).

Il modello di analisi relativa è disponibile in funzione del tempo (2D) e in funzione del tempo e della frequenza (3D).

L'idea di base del modello è determinare una stima del valore del segnale estrapolando la storia conosciuta del segnale prima del punto corrente nel tempo e, quindi, sottrarre il valore stimato dal valore attuale del segnale. La differenza tra il valore attuale e il valore stimato è una misura della variazione del segnale.

L'analisi quindi non produce valori assoluti ma relativi, in conformità con l'udito. Se un segnale acustico non contiene caratteristiche distinte nel tempo o nella frequenza, il modello di analisi relativa produrrà solo valori molto piccoli.

Al fine di differenziare i risultati del relative approach dagli altri parametri acustici e psicoacustici, che misurano valori assoluti, viene utilizzata una nuova unità di misura: la quantità di pressione compressa (Pascal Compresi).

## **5 TECNICHE DI REGISTRAZIONE**

L'ascolto è un momento fondamentale nella valutazione della qualità del suono. Generalmente si ricorre a registrazioni che riproducono più fedelmente possibile le condizioni di ascolto di una sorgente reale, di cui è importante anche la localizzazione spaziale e più in generale la diversa percezione delle due orecchie, dovuta agli effetti di diffrazione e mascheramento della testa umana.

Per questo la registrazione dei suoni per applicazioni in campo psicoacustico viene effettuata attraverso un manichino binaurale o testa artificiale (Figura 6).

Una testa artificiale cattura i suoni come quella umana. La testa rappresenta un ostacolo per le frequenze medie e alte: dalla parte lontana rispetto alla sorgente sonora, l'orecchio è in ombra sonora e la testa blocca le alte frequenze; al contrario, dalla parte rivolta verso la sorgente sonora, c'è un incremento della pressione sonora alle medie e alle alte frequenze. Inoltre le pieghe del padiglione auricolare esterno influenzano la risposta in frequenza riflettendo i suoni nel canale auricolare. Queste riflessioni si combinano con il suono diretto, provocando cancellazioni di fase a determinate frequenze.

Per riassumere: la testa e l'orecchio esterno provocano picchi e attenuazioni nella risposta in frequenza dei suoni ricevuti che variano a seconda dell'angolo di incidenza del suono e della posizione della sorgente.

La risposta in frequenza di una testa artificiale dipende dalla direzione. In altre parole, la testa e l'orecchio esterno funzionano come un equalizzatore, il cui comportamento dipende dalla direzione della sorgente.

Ciascun orecchio cattura un diverso spettro di ampiezza e di fase; queste differenze interaurali variano al variare della posizione della sorgente attorno alla testa.

Quando i segnali dei microfoni della testa artificiale vengono riprodotti dalle cuffie, si ascoltano le stesse differenze interaurali che la testa artificiale ha percepito. Ciò crea l'illusione di immagini posizionate in maniera corrispondente alle sorgenti sonore originali.

Tale realismo non può essere ottenuto dalle tecniche usuali di rilevazione dell'acustica ambientale che prevede l'utilizzo di un singolo microfono omnidirezionale con risposta lineare in frequenza.



Figura 6: Testa artificiale per registrazioni binaurali

## **6 METODI DI VALUTAZIONE SOGGETTIVA NEI TEST DI ASCOLTO**

Per la valutazione della qualità del suono sono utilizzati metodi psicofisici già dimostrati efficaci in psicoacustica.

Tra tutti i possibili metodi ne sono stati selezionati quattro:

- il metodo di classificazione ad accesso casuale - che indica se un prodotto suona meglio di uno concorrente;
- il metodo del differenziale semantico (semantic differential) – che fornisce suggerimenti su quali suoni sono adatti per trasmettere un determinato messaggio, ad esempio un segnale di avvertimento;
- la categorizzazione delle caratteristiche sonore (category scaling) e il metodo della stima della grandezza (magnitude estimation) - che possono dare un'indicazione di quanto la qualità del suono differisce tra diversi prodotti, e spesso sono di particolare importanza per valutazioni costi / benefici.

Naturalmente tutti i metodi hanno specifici vantaggi e svantaggi.

La classificazione ad accesso casuale e il differenziale semantico vengono utilizzati quando è richiesta una descrizione più "qualitativa". Se l'obiettivo è una valutazione "quantitativa" della qualità del suono, metodi come l'ordinamento in classi e la stima della grandezza sono maggiormente indicati. Questi ultimi forniscono dati relativi al livello degli intervalli e rapporti di scala che possono essere facilmente trasformati tramite statistiche parametriche. Mentre l'ordinamento in classi è limitato dalle cinque alle sette categorie di risposta, la stima della grandezza - in linea di principio – ha una risoluzione infinita e può anche fornire zeri assoluti. Tuttavia, nel metodo della stima della grandezza devono essere presi in considerazione l' influenza della scelta del suono o dei suoni di riferimento.

## 6.1 La procedura di classificazione "ad accesso casuale"

In Figura 7 è illustrata la procedura di valutazione detta "ad accesso casuale", molto utilizzata nello studio della qualità del suono. Nell'esempio visualizzato, sei suoni devono essere ordinati in relazione alla loro qualità. Quando si clicca sull'icona altoparlante, si sente il suono corrispondente, ad esempio quello di un motore al minimo. Il compito del soggetto è spostare le icone in uno dei campi vuoti, denotati da 1 a 6, in modo tale che i suoni siano infine ordinati rispetto alla loro qualità percepita.

I soggetti sono liberi di ascoltare ogni singolo suono ogni volta che lo desiderano e di correggere la sequenza finché non ritengono raggiunto uno stato finale a loro congeniale. Questa grande libertà lasciata ai soggetti, che hanno "accesso casuale" ai suoni da mettere in ordine, è uno dei motivi per cui questa procedura è attualmente tra quelle più utilizzate per la classificazione della qualità del suono.

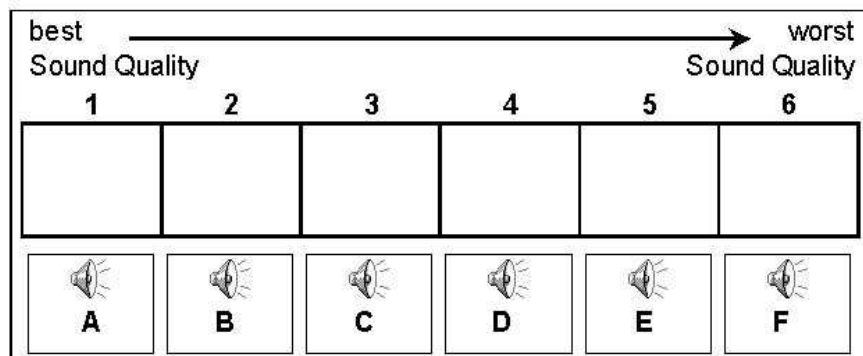


Figura 7: esempio ordinamento della qualità del suono tramite il metodo ad accesso casuale

## 6.2 Il differenziale semantico

Il metodo del "differenziale semantico" è utilizzato per testare quali sono i suoni più adatti ad un determinato utilizzo.

In Figura 8 è fornito un esempio di aggettivi utilizzati in uno studio internazionale sull'idoneità di segnali utilizzati come segnali di allarme. Va da sé che per i segnali di allarme dovrebbero avere un peso elevato aggettivi come pericoloso, spaventoso e sgradevole.

| adjective scales |                 |
|------------------|-----------------|
| loud             | soft            |
| deep             | shrill          |
| frightening      | not frightening |
| pleasant         | unpleasant      |
| dangerous        | safe            |
| hard             | soft            |
| calm             | exciting        |
| bright           | dark            |
| weak             | powerful        |
| busy             | tranquil        |
| conspicuous      | inconspicuous   |
| slow             | fast            |
| distinct         | vague           |
| weak             | strong          |
| tense            | relaxed         |
| pleasing         | unpleasing      |

Figura 8: differenziale semantico da uno studio internazionale sui segnali di allarme

### 6.3 Ordinamento in classi

L'ordinamento in classi o categorie è un buon metodo per la valutazione della sensazione sonora dei suoni.

Solitamente viene utilizzata una suddivisione dalle cinque alle sette categorie. La Figura 9 fornisce alcuni esempi delle categorie utilizzate per la valutazione della sensazione sonora. Rispetto alla scala suddivisa in cinque categorie, la scala di sette presenta inoltre le definizioni "leggermente delicato" e "leggermente forte". Per questo motivo l'intera gamma da "molto delicato" fino a "molto forte" mostra una classificazione più precisa di quanto non faccia la scala in cinque.

Una variante della scala che viene spesso utilizzata in audiologia, così come nella valutazione delle immissioni di rumore, deriva da una suddivisione in cinque classi. Tuttavia, ogni suddivisione è ulteriormente frazionata in dieci sottocategorie, ottenendo così una scala di 50 punti. La relazione tra la scala di 50 punti e la classificazione in cinque categorie è indicata nella parte sinistra della Figura 9. Poiché la classificazione numerica delle categorie può creare dubbi a quale valore corrispondano i valori limite, sono talvolta aggiunte le categorie "non udibile" in basso e "troppo forte" nella fascia alta. "Non udibile",



quindi, corrisponde al silenzio, mentre "troppo forte" può essere correlato a tutti i numeri superiori a 50.

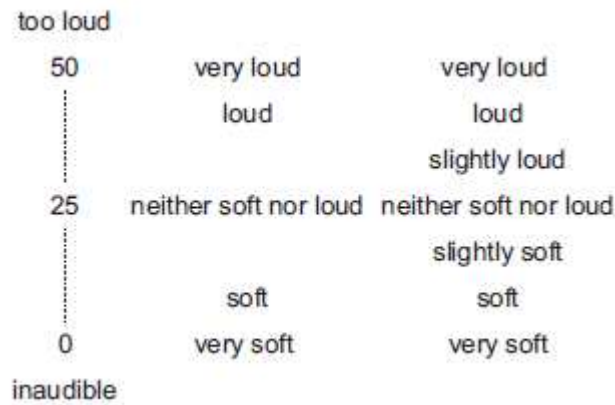


Figura 9: ordinamento in classi con sette categorie, a destra, cinque categorie al centro e 50 sottocategorie a sinistra

## 6.4 Stima della grandezza

I vantaggi del metodo di "stima della grandezza" sono che non presenta incertezze sui massimi valori e, teoricamente, ha una risoluzione infinita. La stima della grandezza - con suoni di riferimento - è un metodo frequentemente usato per la valutazione della qualità del suono di un dispositivo audio<sup>4</sup>.

La procedura, illustrata in Figura 10, prevede che sia presentata una coppia di suoni. Il primo suono, A, viene definito come il "suono di riferimento" e il secondo, B, "suono di prova". Durante l'esperimento il suono di riferimento viene mantenuto costante e il suono di prova viene variato. Un valore numerico, per esempio 100, viene assegnato ad una grandezza psicoacustica predefinita del suono di riferimento, ad esempio alla sensazione sonora. Il compito del soggetto intervistato, di conseguenza, è assegnare un valore numerico al suono di prova B. Questo valore dovrebbe rappresentare il rapporto tra la

<sup>4</sup> La qualità del suono è rappresentata dalla precisione e intelligibilità dell'uscita audio fornita da un dispositivo elettronico. Tale parametro può essere misurato oggettivamente, ad esempio utilizzando appositi strumenti per valutare la precisione con cui il dispositivo riproduce il suono originale, oppure può essere misurata soggettivamente, nel caso in cui venga valutata la risposta degli ascoltatori al suono oppure la somiglianza ad un altro suono

grandezza psicofisica valutata del suono di prova rispetto al suono di riferimento. Se, ad esempio, la sensazione sonora di un suono di prova viene percepita il 20% più debole rispetto al riferimento, la risposta del soggetto deve essere 80. Attraverso la stima della grandezza è possibile ottenere direttamente un indice del valore della grandezza psicofisica esaminata, a vantaggio del rapporto costi/benefici dell'analisi. La differenza di stima della grandezza nelle prove intraindividuali, così come interindividuali, di solito è contenuta in entro il 10%. Tuttavia, la scelta del suono di riferimento, talvolta, può influenzare i risultati della stima della grandezza in modo significativo. Pertanto è raccomandabile utilizzare almeno due suoni di riferimento, uno con un valore elevato della grandezza psicofisica esaminata e l'altro con un valore della stessa molto ridotto.

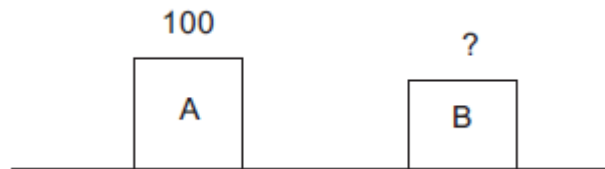


Figura 10: esempio della stima della grandezza

## **7 ASPETTI SEMANTICI E COGNITIVI**

Nel valutare la qualità del suono, il significato ad esso assegnato durante l'ascolto può avere un effetto sul giudizio.

In un mercato globale, può quindi essere di qualche rilevanza prendere in considerazione eventuali differenze culturali. Studi cross-culturali<sup>5</sup> eseguiti su vari ascoltatori in Giappone e in Germania hanno dimostrato che a volte uno stesso suono può essere valutato in modo diverso da soggetti con diversi background culturali.

Per esempio, da soggetti tedeschi il suono di una campana è stato interpretato come il suono di una campana di chiesa, che porta a connotazioni come "piacevole" o "sicuro".

Al contrario, i soggetti giapponesi assegnano alla campana i suoni di un camion dei pompieri o di un passaggio a livello, che corrispondono a sentimenti indicati con i termini "pericoloso" o "sgradevole".

In Figura 11 vengono visualizzati i dati di uno studio effettuato con il metodo della semantica differenziale.

I dati per i soggetti giapponesi sono collegati da una linea continua, i dati di quelli tedeschi da linee tratteggiate.

I dati per i soggetti tedeschi suggeriscono che le sensazioni collegate al suono della campana sono: piacevole, sicuro, attraente e rilassato.

Per i giapponesi invece le sensazioni evocate dal suono della campana corrispondono a: squillante, spaventoso, sgradevole, pericoloso, eccitante, occupato, ripugnante, distinto, forte, teso e sgradevole.

---

<sup>5</sup> Gli studi cross-culturali rappresentano una specializzazione in antropologia e nelle scienze sorelle (sociologia, psicologia, economia, scienze politiche) che utilizza i dati di molte società per esaminare il comportamento umano. A differenza dagli studi comparativi, che esaminano le caratteristiche simili di alcune società, gli studi cross-culturali utilizzano un campione sufficientemente grande in modo che l'analisi statistica possa essere fatta per mostrare le relazioni o per la mancanza o per le relazioni tra i tratti in questione. Questi studi sono indagini di dati etnografici

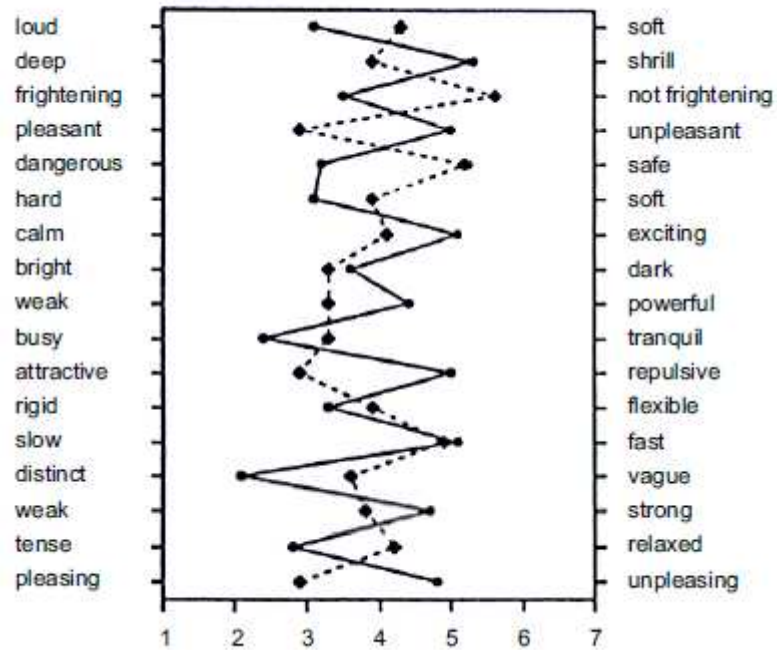


Figura 11: differenziale semantico per il suono di una campana

Al fine di superare le influenze indesiderate legate al significato della sorgente sonora negli esperimenti di psicoacustica, è stata proposta una procedura che rimuove gran parte delle informazioni legate ad uno stimolo.

Lo schema a blocchi visualizzato in Figura 12 illustra la procedura correlata. Da un rumore originale, ad esempio di un treno, viene eseguita l'analisi spettrale per mezzo di una trasformata FTT. L'algoritmo FTT è una tecnica di analisi spettrale che, in contrasto con la trasformata di Fourier, usa una finestra temporale corrispondente ad una frequenza dipendente dalla larghezza di banda che simula la risoluzione di frequenza del sistema uditivo umano. Nelle fasi successive, dopo l'allargamento spettrale e, di conseguenza, oscurando i dati spettrali, il suono è ri-sintetizzato mediante una FTT inversa. In questo modo viene creato un suono con lo stesso involuppo spettrale e temporale e con lo stesso andamento temporale della sensazione sonora dal quale, tuttavia, le informazioni sulla sorgente sonora sono state rimosse.

I dati visualizzati in Figura 13 consentono un confronto tra l'andamento temporale della sensazione sonora del suono originale (a) e quello degli stessi suoni ma con le informazioni sulla sorgente sonora rimosse (b).

I risultati evidenziano che l'obiettivo di ottenere identici andamenti temporali della sensazione sonora dei suoni originali e dei suoni senza informazioni sulla sorgente sonora può essere sicuramente raggiunto. Tramite la procedura illustrata in Figura 12 le informazioni relative alla sorgente sonora possono essere rimosse da molti segnali presenti nella nostra vita quotidiana. Tuttavia, alcuni segnali, come ad esempio l'elaborazione FTT del discorso parlato, hanno ancora una grande somiglianza col suono originale.

Vale la pena ricordare a questo punto che algoritmi per rimuovere il significato dal suono sono stati proposti anche nelle tecnologie utilizzate negli studi di prosodia<sup>6</sup>.

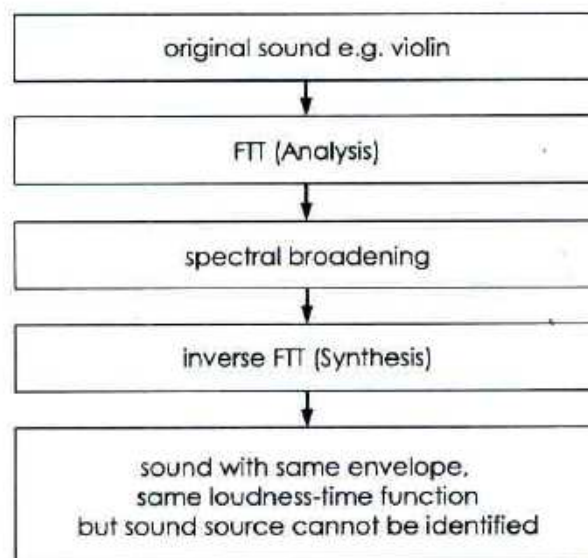


Figura 12: schema a blocchi illustrante la procedura per oscurare le informazioni sulla sorgente sonora

---

<sup>6</sup> La prosodia è quella parte della linguistica che studia l'intonazione, il ritmo, la durata (isocronia) e l'accento del linguaggio parlato

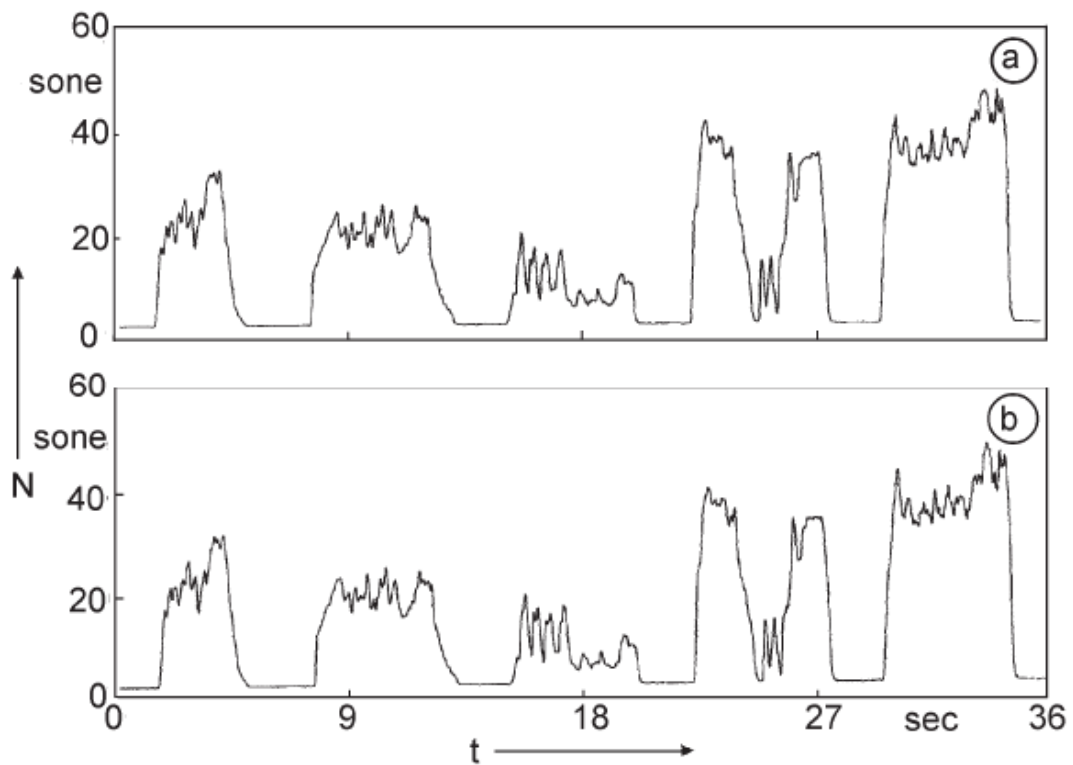


Figura 13: andamento temporale della sensazione sonora.  
Suono originale (a) e suono processato (b)

Per verificare quanto la valutazione della sensazione sonora è influenzata dalle informazioni relative alla sorgente sonora, la loudness dei suoni elencati nella Tabella 1 è stata stabilita con il metodo della stima della grandezza attraverso un suono di riferimento. Sono stati valutati sia i suoni originali, così come i suoni trattati, secondo la procedura descritta nella Figura 12. Come suono di riferimento è stato scelto il suono di un asciugacapelli (suono n. 5).

Il metodo della stima della grandezza con un segnale di riferimento prevede che lo sperimentatore presenti uno stimolo standard a cui assegna un numero denominato modulo. Per gli stimoli successivi, i soggetti riferiscono numericamente l'intensità percepita rispetto allo standard in modo da mantenere il rapporto tra le sensazioni e le stime numeriche (ad esempio, ad un suono percepito due volte più forte dalla norma deve essere assegnato un numero doppio del modulo).

I risultati visualizzati in Figura 14 mostrano che in tutti i casi i soggetti hanno valutato il suono di riferimento (suono n. 5) perfettamente, ovvero assegnando il numero 100. Questo

vale sia per il suono originale che per il suono elaborato. Per quanto riguarda gli altri suoni, c'è solo una piccola differenza nella valutazione della sensazione sonora tra i suoni originali rispetto a quelli trasformati. In tutti i casi tranne uno (suono n. 11), gli intervalli interquartili si sovrappongono. Il trattamento statistico dei dati (Rank Test Wilcoxon Sum) mostra diverse valutazioni tra il suono originale e quello processato per i suoni n. 2, n. 4 e n. 11 sul livello dello 0.1%.

I risultati visualizzati in Figura 14 possono essere interpretati in modo tale che le informazioni relative alla sorgente sonora abbiano poca influenza sulla valutazione della sensazione sonora. Considerando le mediane, in quattro su 19 casi i suoni processati producono una loudness maggiore rispetto ai suoni originali. Nei restanti 15 casi, i suoni originali producono una sensazione sonora più elevata rispetto ai suoni trasformati o entrambi i suoni producono la stessa sensazione sonora. Tuttavia, come già indicato, a causa della sovrapposizione degli intervalli interquartili, queste differenze non vanno sovrastimate.

|    |                    |
|----|--------------------|
| 1  | children at play   |
| 2  | ringing telephone  |
| 3  | urban road noise   |
| 4  | vacuum cleaner     |
| 5  | hair dryer         |
| 6  | church bells       |
| 7  | waterfall          |
| 8  | highway            |
| 9  | train station      |
| 10 | commuter train     |
| 11 | electric razor     |
| 12 | door bell          |
| 13 | piano              |
| 14 | violin             |
| 15 | electric drill     |
| 16 | trumpet            |
| 17 | passing train      |
| 18 | passing motorcycle |
| 19 | jack hammer        |

Tabella 1: suoni valutati

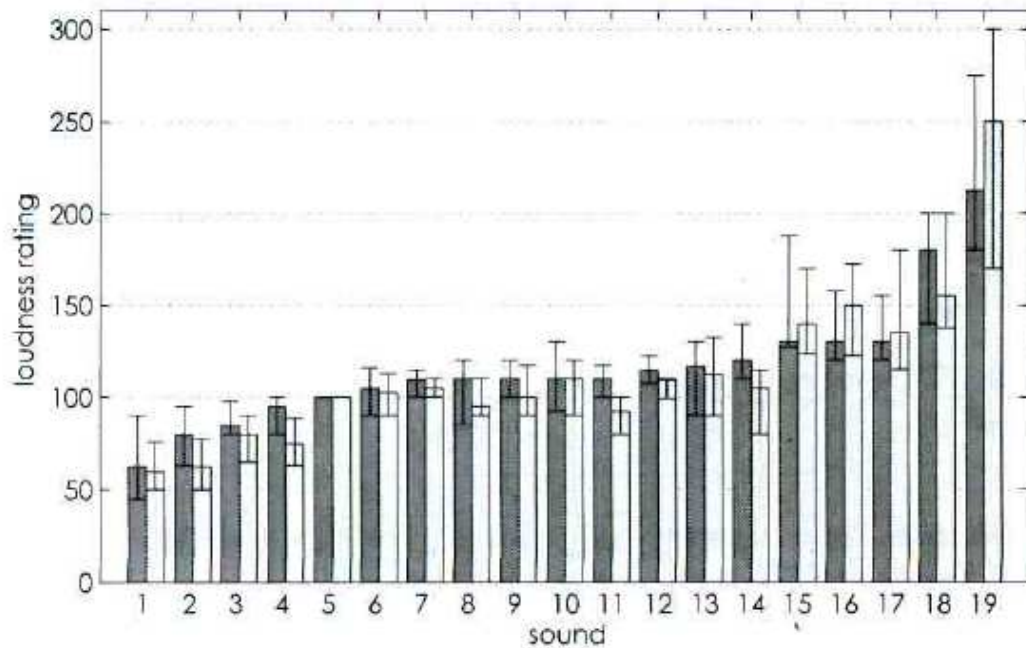


Figura 14: valutazione della sensazione sonora dei suoni da 1 a 19. I suoni originali sono indicati nelle colonne grigio scuro, i suoni elaborati nelle colonne grigio chiaro (mediane e interquartili)

Al contrario, l'identificazione della sorgente sonora può influenzare significativamente la valutazione del disturbo. Per esempio, il suono originale di una macchina da caffè, mentre eroga caffè fresco, è stato preferito rispetto alla versione elaborata, nonostante lo stesso andamento della sensazione sonora nel tempo. Anche il suono originale del tintinnio dei calici di vino produce molto meno fastidio per rispetto allo stesso suono elaborato. D'altra parte, per molti altri suoni non solo la valutazione della sensazione sonora ma anche la valutazione del disturbo è risultata influenzata solo in piccola parte dall'effetto del suono riprocessato quando è stato possibile identificare la sorgente sonora.

In sintesi, l'identificazione di una sorgente sonora specifica sembra giocare un ruolo secondario nella valutazione della sensazione sonora, ma a volte può influenzare fortemente la valutazione del disturbo.



## **8 ASPETTI VISIVI**

La valutazione della qualità sonora può dipendere non solo dagli stimoli uditivi, ma anche da sollecitazioni di altri sensi, come per esempio il sistema visivo. I successivi due esempi illustrano questo punto di vista.

Il primo esempio riguarda l'influenza delle immagini nella valutazione della qualità sonora del parlato. Dal palco di una sala da concerto è stato trasmesso un discorso, registrato contemporaneamente in diverse posizioni nella platea. In un primo esperimento i soggetti hanno ascoltato il discorso registrato e valutato la qualità vocale. In un ulteriore esperimento, in aggiunta alla presentazione acustica dei suoni vocali, ai soggetti sono state presentate le foto prese alla rispettiva posizione di registrazione, raffigurante la distanza tra la sorgente ed il punto di ricezione. La Figura 15 mostra una pianta del piano terra, che indica il suono sorgente S e le tre posizioni, da 1 a 3, del ricevitore. I suoni inviati dal diffusore S sono stati registrati su nastro DAT nelle posizioni 1, 2 e 3. Inoltre, le foto scattate in queste posizioni, mostrano l'altoparlante e permettono agli ascoltatori di valutare la loro distanza dal punto ricevente.

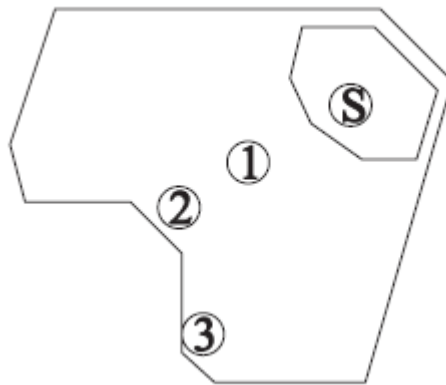


Figura 15: pianta del piano terra di una sala da concerto con le indicazioni della sorgente sonora S, e le tre posizioni, da 1 a 3, del ricevitore

La Figura 16 riporta le valutazioni fornite sulla qualità della voce per la sola presentazione acustica, indicate nella figura dai cerchi vuoti, o con l'ulteriore presentazione visiva, indicate dai cerchi pieni. I dati mostrano che un'immagine può influenzare la valutazione della qualità sonora della voce. Nella posizione 1, relativamente vicina alla

sorgente, l'aggiunta dell'immagine fa sì che il punteggio degradi da “discreta” a “scarsa”. Questo può essere dovuto all'effetto che la distanza visivamente percepita dal microfono, che è relativamente piccola, suggerisce una migliore qualità del suono, non influenzata dal riverbero come in una sala da concerto. La sala concerto, tuttavia, è stata progettata per la musica classica e, quindi, ha un tempo di riverberazione alle medie frequenze di circa 2 secondi, valore troppo elevato per la voce. Per una migliore intelligibilità del parlato sarebbe infatti ottimale un tempo di riverbero inferiore a 1 secondo. Nella posizione 2 non vi è alcuna influenza dell'immagine sul punteggio assegnato alla qualità vocale; i soggetti sono indotti a pensare che per tale distanza dal diffusore la qualità sia corretta. Più interessante è la valutazione della posizione 3. Senza informazioni visive la qualità di conversazione è valutata come “discreta”. Con l'aggiunta di informazioni visive la qualità della conversazione è valutata addirittura come “buona”. Data la grande distanza tra il diffusore S e il punto di ricezione 3 i soggetti ritengono che in una tale situazione avversa la qualità della voce possa essere valutata come “buona”.

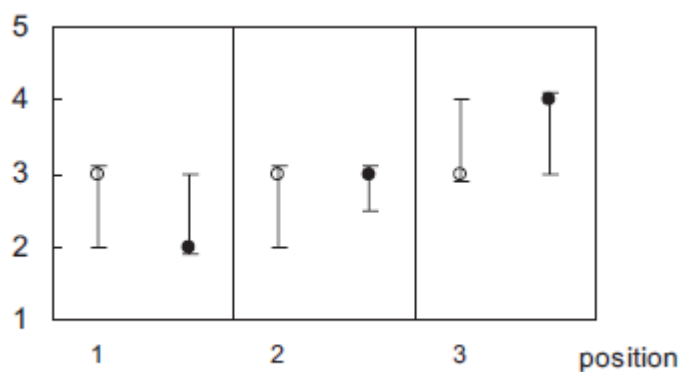


Figura 16: valutazione della qualità del parlato in una sala da concerto nelle posizioni 1, 2 e 3; presentazione acustica sola (cerchi vuoti) e presentazione acustica più visiva (cerchi pieni)

L'ultimo esempio tratta dell'influenza del colore sulla valutazione della loudness di sorgenti sonore. Il suono del passaggio di un treno è stato presentato sia senza input visivi sia con le immagini dello stesso treno, ma con colori differenti. I relativi risultati sono indicati in Figura 17.

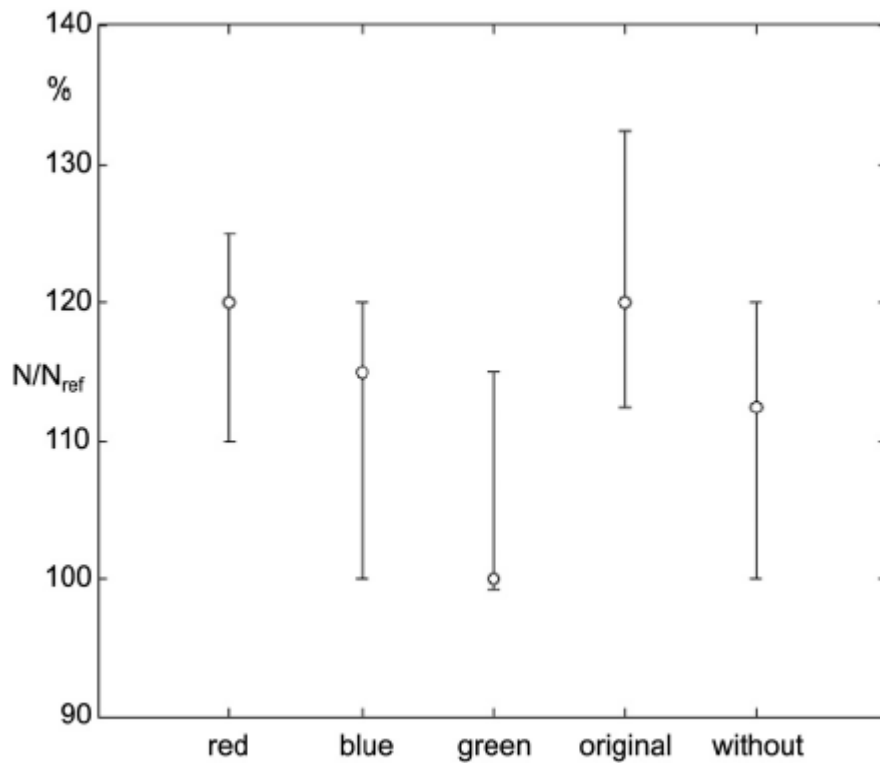


Figura 17: valutazione della loudness del suono di un treno in corsa effettuata presentando le foto del treno in colore diverso insieme con il suono

Nonostante identici stimoli acustici, il suono del treno è percepito come più tenue quando il treno è dipinto in un verde chiaro. La valutazione della loudness di questa configurazione viene quindi presa come riferimento nel proseguimento dell'esperimento. Secondo i risultati visualizzati in Figura 17, un treno dipinto in rosso è percepito circa il 20% più forte dello stesso treno in verde.

L'immagine originale del treno - un treno ad alta velocità ICE - è bianco con una striscia rossa. In questo caso la relativa loudness raggiunta è anche del 120% del riferimento. Se il suono del treno è presentato senza input visivi, viene percepito come più debole rispetto alla presentazione del suono con l'immagine originale - molto simile ad un treno dipinto in blu. In sintesi quindi, il colore di un prodotto può influenzare la loudness e quindi, in una certa misura, la qualità del suono.

## **9 ESEMPI DI POSSIBILI APPLICAZIONI IN CAMPO AMBIENTALE**

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di studi volti all'applicazione delle tecniche di valutazione soggettive dei test di ascolto e la relative correlazioni con i parametri psicoacustici, in campo ambientale.

### **9.1 Valutazione del disturbo attraverso la sensazione sonora (loudness)**

Negli anni 60 erano utilizzati vari metodi per valutare il disturbo da rumore.

Su pressione del mondo industriale, l'International Standardization Organization (ISO) è stato spinto a normalizzare un metodo non solo pratico, ma che indicasse anche valori corretti ed adeguati. La normalizzazione è un processo che richiede tempo, per cui si decise di risolvere il problema in due fasi.

Il primo passo fu definire un metodo semplice e facilmente implementabile utilizzando apparecchiature relativamente economiche, attraverso la misurazione del livello SPL ponderato A.

L'ISO era consapevole del fatto che questo metodo iniziale poteva produrre risultati imprecisi o addirittura fuorvianti nel controllo dei livelli di rumore. Pertanto, ha proceduto alla definizione di una seconda norma, non così semplice come la prima, ma che forniva valori molto più assimilabili alla percezione umana del suono. Attraverso la norma 532 "Acoustics –Method for calculating loudness level", pubblicata solo pochi anni dopo la proposta della ponderazione della pressione sonora con la curva A, sono stati definiti due metodi omologhi per il calcolo dell'intensità soggettiva.

Il primo mette in relazione la sensazione sonora con le bande critiche della frequenza, dove per banda critica si intende un intervallo di frequenze entro il quale due toni puri simultanei non possono essere percepiti come distinti (modello loudness). La seconda tipologia di calcolo è in funzione dell'andamento nel tempo dell'intensità soggettiva totale, che normalmente può essere misurata solo tramite un apposito strumento (loudness meter). Dato che la sensazione sonora del rumore spesso dipende fortemente dal tempo,

tipicamente viene utilizzata una distribuzione cumulativa. Questa distribuzione indica la percentuale di tempo in cui viene raggiunto o superato un determinato livello di loudness.

Al fine di ottenere una maggiore padronanza dell'intensità soggettiva, la Figura 18 mostra un confronto tra la sensazione sonora rispetto ad un indicatore dei livelli misurati.

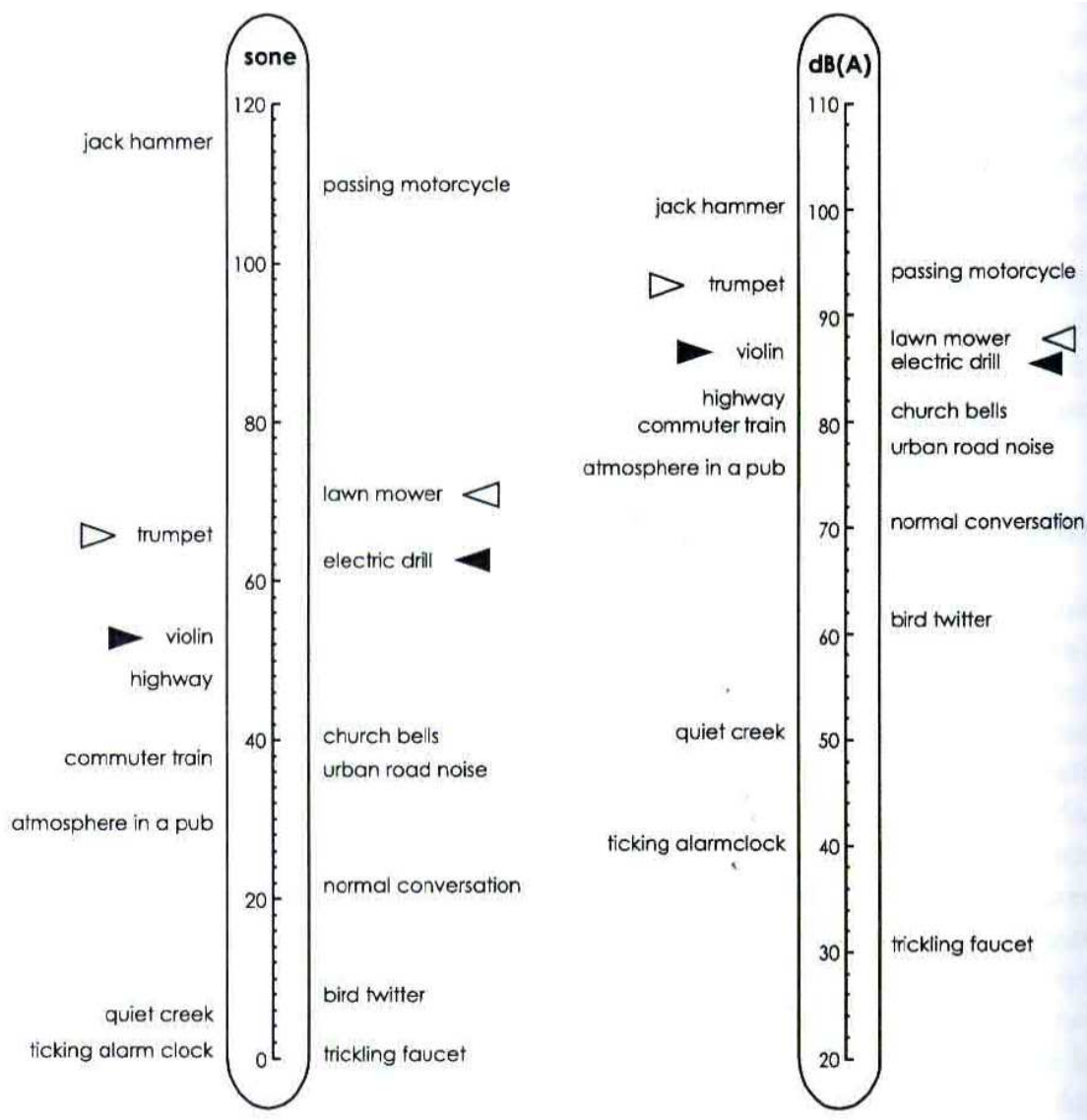


Figura 18: sensazione sonora (sinistra) rispetto ai livelli sonori (destra)

Entrambe le scale dimostrano che il martello pneumatico è piuttosto forte e un rubinetto gocciola piuttosto piano. Un esame più attento rivela però che la sequenza di suoni a volte è diversa. Ad esempio: sulla scala dei livelli, la tromba è sopra il tosaerba, ma sulla scala della sensazione sonora è vero il contrario. Allo stesso modo, il violino e il trapano elettrico

producono quasi lo stesso livello di rumore, ma la sensazione sonora del trapano elettrico è più alta. Tali differenze sono dovute principalmente a differenti distribuzioni spettrali e alle strutture temporali del suono. Inoltre si potrebbe sospettare che il suono musicale di un violino è preferibile al suono tecnologico di un trapano elettrico, influenzando la valutazione delle rispettive intensità sonore. Tuttavia, attraverso l'applicazione della procedura di cui al capitolo 7, si è potuto dimostrare che gli effetti cognitivi come l'identificazione della sorgente sonora svolgono un ruolo secondario nella valutazione della sensazione sonora.

L'utilizzo di una procedura di calcolo della sensazione sonora risulta efficace per la riduzione del rumore. L'esempio applicativo di un'esperienza condotta in una falegnameria può dare varie informazioni sui suoi vantaggi. Inizialmente il suono era quello di una sega circolare, che produceva un rumore a banda stretta spettralmente dominante insieme ad un tono puro. La Figura 19a evidenzia l'intensità soggettiva originale indicando una vasta area intorno agli 1.25 kHz (canale 9), che fornisce un grande contributo alla sensazione sonora totale. In primo luogo questa dominante parziale è stata ridotta utilizzando speciali lame circolari a rumore ridotto. Il rumore rimanente, come mostrato in Figura 19b, era a questo punto un rumore a banda larga con un SPL ponderato A relativamente basso, ma una sensazione sonora relativamente grande. Pertanto, un'ulteriore riduzione del rumore è stata effettuata operando nella regione di frequenze più alte, intervenendo in modo più semplice rispetto alle frequenze più basse. In questo modo, l'intensità soggettiva è stata ulteriormente ridotta, come indicato nel grafico di Figura 19c. La relativa riduzione di loudness da 27.5 a 18.3 e infine a 13.5 son (GF) corrisponde ai fattori di 1.50 e 1.36. Queste proporzioni indicano che anche la seconda fase è stata molto efficace, sebbene la riduzione di SPL ponderato A è stata solo di 4 dB(A), a fronte di una riduzione pari a 13 dB(A) nella prima fase.

I lavoratori della fabbrica sono risultati molto soddisfatti dalla seconda fase dell'intervento.

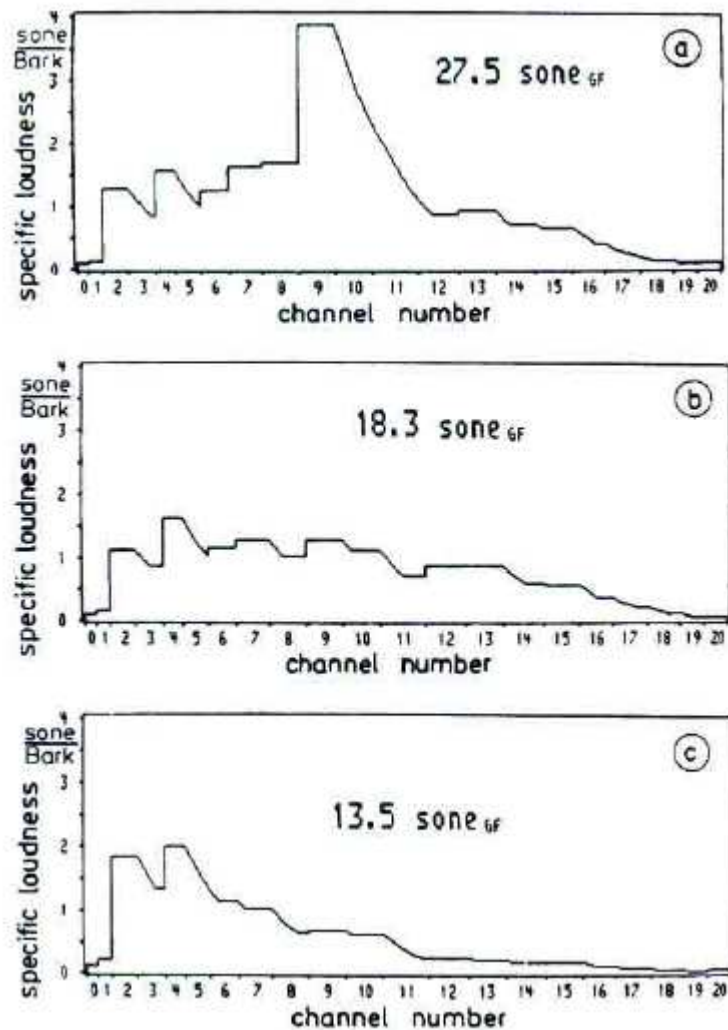


Figura 19a-c: sensazione sonora in funzione della banda critica di frequenza espressa in numero di canali, per le tre fasi di attività di riduzione del rumore in una falegnameria. Situazione originale (a), utilizzando speciali lame circolari (b) e con assorbimento addizionale (c). Il valore di sensazione sonora totale è indicato in ogni pannello

L'intensità soggettiva di un suono stazionario può essere valutata dal programma per PC pubblicato nella DIN 45631. Per suoni con forti variazioni temporali, tuttavia, l'elaborazione temporale non lineare della sensazione sonora da parte del sistema uditivo umano deve essere simulata attraverso l'utilizzo di un loudness meter. Il loudness meter calcola l'intensità soggettiva corrispondente alla norma ISO 532B quasi istantaneamente, vale a dire in base a caratteristiche temporali simili al nostro sistema uditivo. Al fine di simulare le caratteristiche del nostro sistema uditivo, inoltre, deve essere fatta un'analisi delle bande critiche ogni 2 ms. Ciò significa che è necessario utilizzare un banco di filtri in

modo da simulare la selettività di frequenza del nostro orecchio interno. Una ulteriore indicazione che può fornire un loudness meter è relativa alla distribuzione statistica, vale a dire la percentuale di tempo in cui una determinata intensità è raggiunta o superata. Tale distribuzione statistica è di importanza nei casi in cui il volume varia fortemente in funzione del tempo e per la valutazione delle immissioni acustiche.

La Figura 20 mostra un esempio relativo all'andamento della sensazione sonora del parlato in funzione del tempo.

Negli esperimenti di psicoacustica la sensazione sonora del parlato continuo (CCITT Rec.G227, segnale codificato per l'intelligibilità del parlato nelle telecomunicazioni) è fatta corrispondere all'intensità soggettiva di una frase di prova.

I dati visualizzati in Figura 20 rivelano che la sensazione sonora di una frase non corrisponde affatto al valore medio della loudness espresso in funzione del tempo, ma piuttosto ad un valore vicino alla massima sensazione sonora.

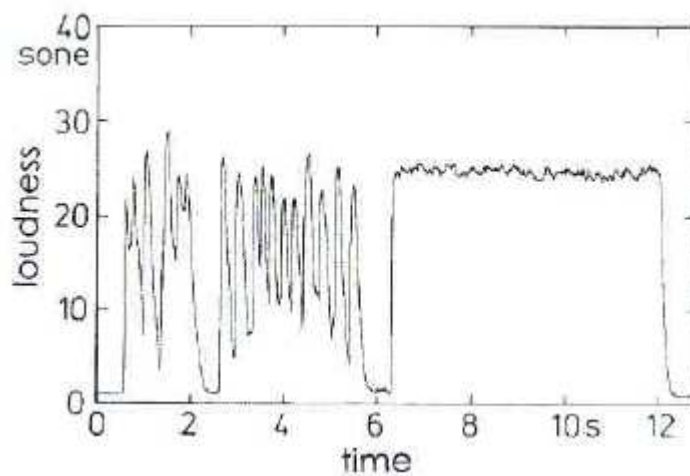


Figura 20: sensazione sonora in funzione del tempo di una frase di test (a sinistra) e del rumore parlato continuo (lato destro) per sensazioni sonore di pari intensità

L'analisi statistica visualizzata in Figura 21, distribuzione cumulativa della sensazione sonora, rivela che il parlato continuo produce quasi la stessa intensità durante l'intera prova (linea tratteggiata), mentre la sensazione sonora della frase di test varia notevolmente con il tempo (linea continua). Il punto di incrocio delle due curve in Figura 21 indica che la sensazione sonora del parlato può essere descritta dal percentile  $N_7$ , cioè il valore di loudness raggiunto o superato per il 7% del tempo di misura.



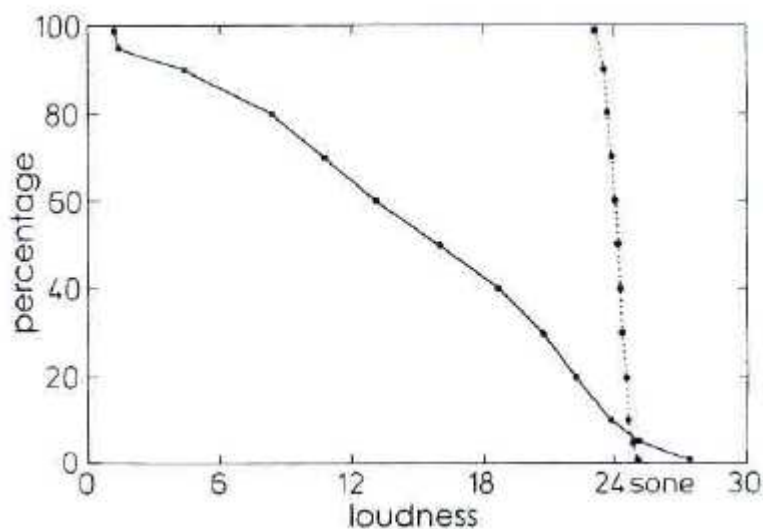


Figura 21: distribuzione cumulativa della frase di prova (linea continua) e del rumore del parlato (linea tratteggiata) per eguale sensazione sonora

## 9.2 Valutazione delle emissioni sonore

Il rumore emesso dalle diverse sorgenti sonore può essere valutato soggettivamente mediante esperimenti di psicoacustica e fisicamente attraverso l'utilizzo di dispositivi per la misura del rumore, come i loudness meters.

Per le valutazioni soggettive di solito viene utilizzato il metodo della stima della grandezza attraverso un suono di riferimento. Per la misurazione fisica delle emissioni sonore è consigliabile utilizzare il percentile della sensazione sonora  $N_5$ , anche se, per un gran numero di emissioni, la sensazione sonora massima  $N_{max}$  fornisce quasi gli stessi valori.

La Figura 22 riporta l'esempio della valutazione delle emissioni sonore di varie tipologie di stampanti. Sono state prese in considerazione diverse stampanti ad aghi (A, B, E, F, G), stampanti a "margherita" (C, D) ed una stampante a getto d'inchiostro (H). Le valutazioni soggettive della loudness sono indicate dai cerchi; la sensazione sonora misurata da un loudness meter è indicata con gli asterischi. I segni più indicano la potenza sonora ponderata A, utilizzata in molte nazioni per descrivere l'emissione acustica dei prodotti. Tutti i dati sono stati normalizzati rispetto ai valori della stampante F.

I dati visualizzati in Figura 22 indicano che la sensazione sonora delle differenti stampanti ad aghi può differire di un fattore pari a 2 (F rispetto a B). Una stampante a getto d'inchiostro produce circa una sensazione sonora pari a 1/3 della sensazione sonora di una stampante ad aghi (H rispetto alla F).

Un confronto tra asterischi e cerchi in Figura 22 rivela che la valutazione soggettiva può essere prevista mediante la misurazione fisica tramite l'utilizzo di un loudness meter. D'altra parte, la potenza sonora ponderata A sopravvaluta la differenza drasticamente.

Ad esempio si afferma frequentemente nella pubblicità di settore che l'emissione di rumore della stampante G è del 90% inferiore a quella della stampante F. Ciò è corretto in termini fisici di potenza sonora ponderata A. Tuttavia, la differenza di volume percepito dal cliente è solo circa il 35%, in linea con le indicazioni di un loudness meter.

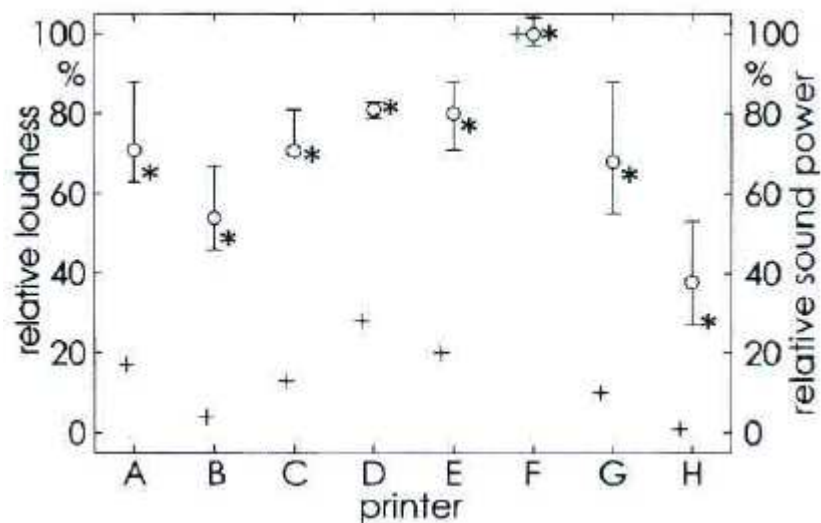


Figura 22: valutazione delle emissioni di rumore di diverse stampanti. Percezione sonora valutata soggettivamente (cerchi) o da un loudness meter (asterischi) rispetto al relativo valore di potenza sonora ponderato A (segno più)

Dunque, le riduzioni delle emissioni acustiche dei prodotti devono essere eventualmente indicate in rapporti tra le specifiche sensazioni sonore piuttosto che tramite gli esagerati rapporti tra le potenze sonore.

I risultati visualizzati in Figura 23 illustrano l'emissione acustica di diversi tipi di velivoli durante il decollo, normalizzati rispetto ai valori dell'aeromobile A.

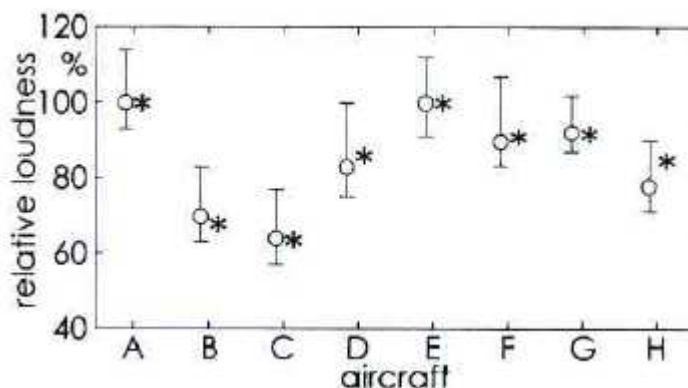


Figura 23: valutazione delle emissioni sonore di diversi aeromobili durante il decollo. I dati delle valutazioni soggettive (cerchi) e delle misure fisiche di un loudness meter (asterischi)

Un confronto tra i dati illustrati dimostra ancora una volta il potenziale predittivo delle misure fisiche effettuate da un loudness meter, nel rispetto della valutazione soggettiva della sensazione sonora delle emissioni acustiche. Un vecchio aereo, equipaggiato con motori a reazione a basso rapporto di diluizione BPR (esempio A ed E), presenta un fattore di circa 1.5 maggiore rispetto a un aeromobile moderno, con motori ad alto rapporto di diluizione (per esempio B e C).

Va ricordato che il concetto di rumorosità introdotto da Karl D. Kryter e utilizzato per la certificazione degli aeromobili è in linea con la valutazione soggettiva. D'altra parte, una potenza sonora ponderata A, oppure ponderata D, sostanzialmente sovrastima la differenza tra i livelli di rumore prodotti dai diversi tipi di aerei.

Per quanto riguarda il rumore ferroviario, la tipologia di rumore prodotto generalmente dipende dal tipo di treno, dalla lunghezza e dalla velocità.

La Tabella 2 fornisce una panoramica di alcuni casi presi in esame.

|   | Type of train   | Length [m] | Speed [km/h] |
|---|-----------------|------------|--------------|
| A | Freight train   | 520        | 86           |
| B | Passenger train | 95         | 102          |
| C | Express train   | 228        | 122          |
| D | ICE             | 331        | 250          |
| E | ICE             | 331        | 250          |
| F | Freight train   | 403        | 100          |
| G | Freight train   | 175        | 90           |

Tabella 2: panoramica di alcune tipologie di rumore esaminati

I corrispondenti risultati delle valutazioni soggettive negli esperimenti di psicoacustica e delle misure fisiche effettuate utilizzando un loudness meter sono riportati nella Figura 24. Tutti i dati vengono normalizzati rispetto ai valori del treno C.

I dati visualizzati in Figura 24 indicano che anche nel caso del rumore prodotto dalle infrastrutture ferroviarie, le misure fisiche della sensazione sonora effettuate da un loudness meter sono in grado di prevedere la valutazione soggettiva della sensazione sonora. I valori più bassi di loudness sono prodotti da treni relativamente corti (B e G) transitanti a velocità media. I valori di loudness maggiori sono prodotti da un treno merci lungo (A) che viaggia a bassa velocità e da treni ad alta velocità (D ed E).

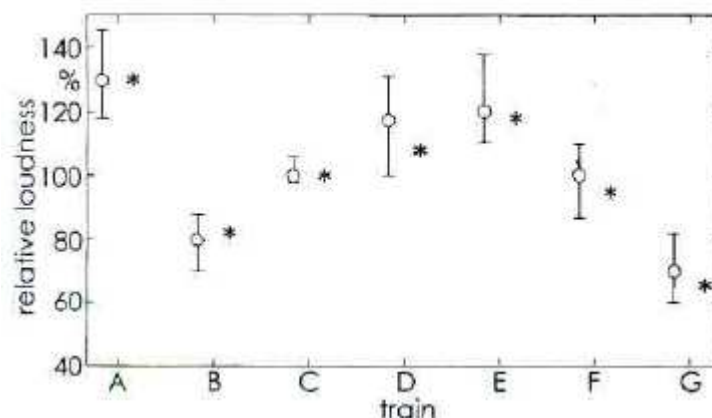


Figura 24: valutazione delle emissioni prodotte dai treni descritti nella Tabella 2. I dati delle valutazioni soggettive (cerchi) sono confrontati con le misure di un loudness meter (asterischi)

L'ultimo esempio riguarda l'emissione acustica di un tagliaerba. Sono stati studiati prodotti di varie marche funzionanti ad un numero di giri al minuto diversi. I risultati sono riportati nella Figura 25. Tutti i valori sono stati normalizzati rispetto ai dati relativi al tagliaerba n. 9.

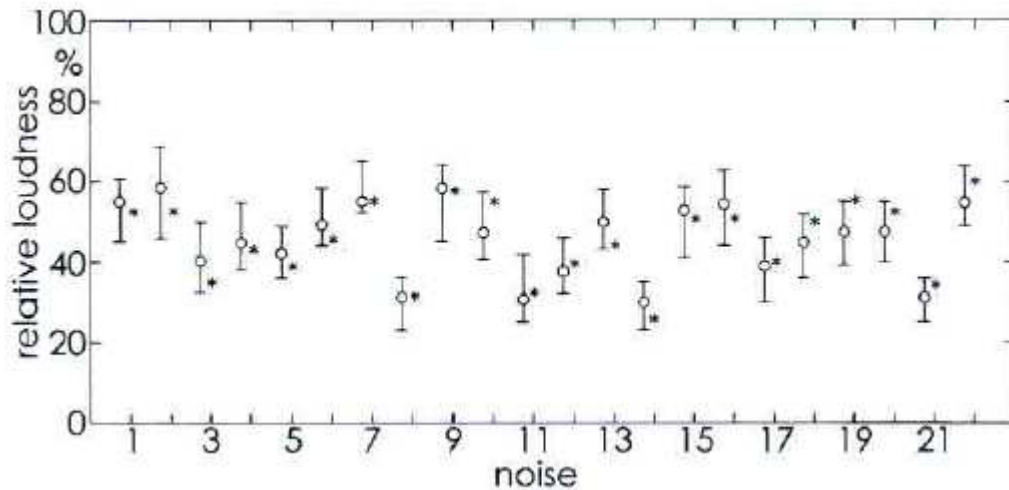


Figura 25: valutazione delle emissioni rumorose dei tagliaerba. I dati delle valutazioni soggettive (cerchi) sono confrontati le misure di loudness meter (asterischi)

Un confronto tra i dati illustrati in Figura 25 indica che anche nel caso in esame la sensazione sonora percepita può essere prevista da misurazioni effettuate utilizzando un loudness meter.

In sintesi, la loudness delle emissioni acustiche può essere fisicamente misurata da un loudness meter in linea con le valutazioni soggettive per varie tipologie di rumori. Al contrario la potenza sonora ponderata A, anche se spesso utilizzata in pubblicità, di solito sovrastima in modo sostanziale le differenze di sensazione sonora.

### 9.3 Valutazione delle immissioni di rumore

Negli esperimenti di psicoacustica, le immissioni di rumore sono spesso valutate come segue: ai soggetti intervistati vengono presentati stimoli sonori di circa 15 minuti di durata che includono un leggero rumore di fondo (ad esempio, il rumore del traffico veicolare di 40 dB (A)), oltre ad una serie di eventi più forti (ad esempio il sorvolo di aeromobili). Durante le prove, il soggetto deve indicare la sensazione sonora istantanea variando la

lunghezza di una barra presentata sul monitor di un PC. Alla conclusione dell'esperimento l'intervistato è tenuto a compilare un questionario in cui viene chiesto - tra l'altro - di indicare la sensazione sonora globale degli ultimi 15 minuti segnando la lunghezza di una linea. Questa valutazione soggettiva della sensazione sonora complessiva di una immissione di rumore (espressa in mm di lunghezza di una linea) può essere confrontata con le grandezze fisiche dell'immissione di rumore. Si scopre che in molti casi la sensazione sonora complessiva percepita delle immissioni di rumore corrisponde al percentile  $N_5$  misurato da un loudness meter. Il valore  $N_5$  è la sensazione sonora che viene raggiunta o superata per il 5% del tempo di misura.

La Figura 26 mostra l'esempio della sensazione sonora valutata in funzione del tempo di 15 immissioni acustiche di rumore aereo quando si utilizzano vecchi aerei rumorosi (B) confrontati aerei più moderni e silenziosi (C).

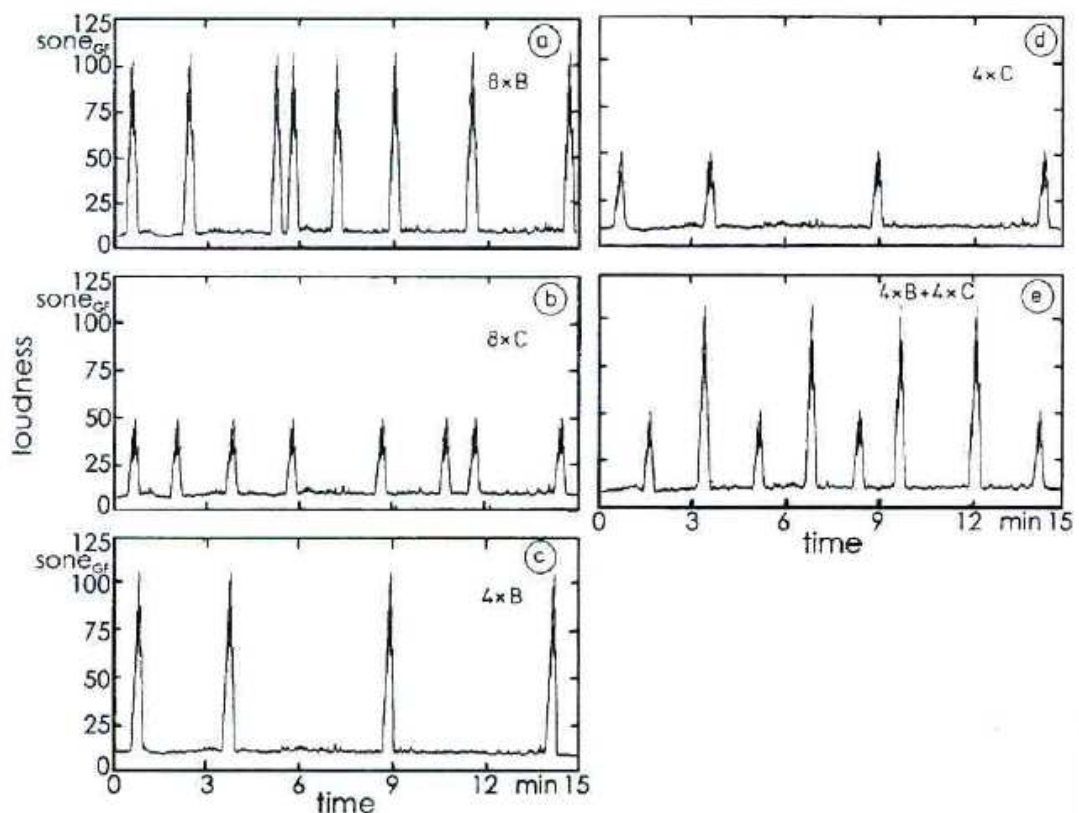


Figura 26a-e: sensazione sonora in funzione del tempo di immissioni di rumore. Rumore di fondo del traffico stradale a cui viene sovrapposto: (a) 8 decolli di aerei molto rumorosi B, (b) 8 aerei meno rumorosi C, (c) 4 aerei rumorosi B, (d) 4 aerei meno rumorosi C, (e) 4 aerei B e 4 aerei C

I dati rappresentati in Figura 27 come cerchi indicano la valutazione soggettiva delle immissioni di rumore illustrate in Figura 26 e possono essere confrontati con i dati delle misure, rappresentati dagli asterischi. La lunghezza della linea che indica percezione sonora complessiva soggettivamente avvertita è rappresentato nell'ordinata sinistra, il percentile correlato  $N_5$  nell'ordinata destra.

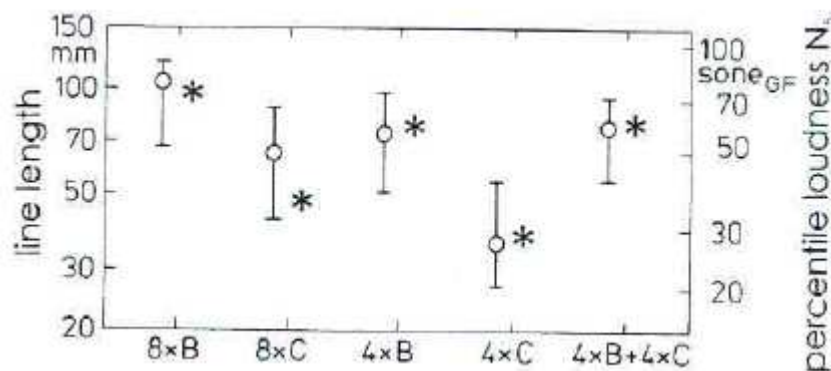


Figura 27: sensazione sonora complessiva delle immissioni di rumore illustrate in Figura 26. Cerchi: lunghezza della linea abbinata alla percezione sonora soggettivamente percepita. Asterischi: valore percentile  $N_5$  della sensazione sonora misurata da un loudness meter

Il confronto dei dati soggettivi e quelli fisici, visualizzato in Figura 27, suggerisce che il percentile  $N_5$  è un buon predittore della percezione sonora complessiva soggettivamente percepita delle immissioni di rumore prodotte dagli aerei.

Come accennato i valori percentili della sensazione sonora possono prevedere la sensazione sonora complessiva delle immissioni rumorose del traffico stradale, del traffico ferroviario, delle industrie, ma anche in casi particolari come il rumore prodotto durante le attività sportive.

In molte norme le immissioni di rumore sono valutate dall'energia equivalente del livello  $L_{eq}$  ponderato A. Tuttavia, anche per valori simili di  $L_{Aeq}$ , le immissioni di rumore di diversi metodi di trasporto e infrastrutture possono essere valutati in modo differente. I corrispondenti risultati delle ricerche effettuate sul campo sono stati denominati "bonus ferroviario" o "malus aeromobili" ad indicare che allo stesso livello  $L_{Aeq}$  il rumore ferroviario può essere meno fastidioso di rumore del traffico veicolare, mentre il rumore degli aerei può essere più fastidioso del rumore prodotto dalle infrastrutture stradali.

La Figura 28 mostra i risultati dei corrispondenti esperimenti di psicoacustica. Le immissioni di rumore di 15 minuti di durata di diverse infrastrutture di trasporto, a parità di  $L_{Aeq}$  70 dB(A), sono stati giudicate in base alla sensazione sonora complessiva, indicata dalla lunghezza della linea.

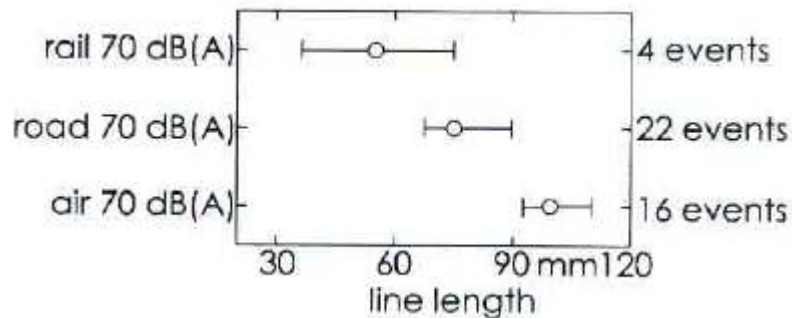


Figura 28: sensazione sonora complessiva delle immissioni sonore prodotte dal traffico ferroviario, dal traffico stradale e dal traffico aereo, ciascuno con lo stesso  $L_{eq}$  di 70 dB(A) valutato su 15 minuti

I dati psicoacustici visualizzati in Figura 28 sono in linea con i concetti di "bonus ferroviario" e "malus aeromobili" proposti sulla base dei risultati degli studi effettuati sul campo. Per le immissioni di rumore con lo stesso  $L_{Aeq}$  di 70 dB(A), la sensazione sonora complessiva indicata negli esperimenti di psicoacustica dalla lunghezza di una linea tende ad aumentare dalla ferrovia alla strada fino al traffico aereo.

Come spiegazione della minor sensazione sonora prodotta dalla ferrovia, possono essere avanzate almeno due ipotesi. Da un punto di vista ingegneristico, si può affermare che il rumore del traffico stradale è caratterizzato da maggiori componenti tonali in bassa frequenza che vengono sottovalutate dalle curve di ponderazione A. Quindi, a parità di  $L_{Aeq}$ , il traffico stradale è percepito come più forte del traffico ferroviario. In generale, i livelli ponderati A per i suoni con forti componenti a bassa frequenza potrebbero venire penalizzati fino a 4 dB rispetto all'infrastruttura ferroviaria.

Un'ipotesi alternativa, sulla base degli effetti cognitivi, vuole che i suoni prodotti dalle ferrovie potrebbero suscitare sentimenti nostalgici a proposito dei "bei vecchi tempi andati" e quindi per livelli di  $L_{Aeq}$  piuttosto simili, il rumore della ferrovia risulterebbe preferibile rispetto al rumore del traffico stradale. Per stimare l'entità di tali effetti cognitivi sia il rumore



ferroviario che il rumore del traffico stradale sono stati elaborati con il procedimento descritto nel capitolo 7, oscurando le informazioni sulla sorgente sonora. I risultati degli esperimenti con i suoni corrispondenti, della durata di 5 minuti, sono visualizzati in Figura 29.

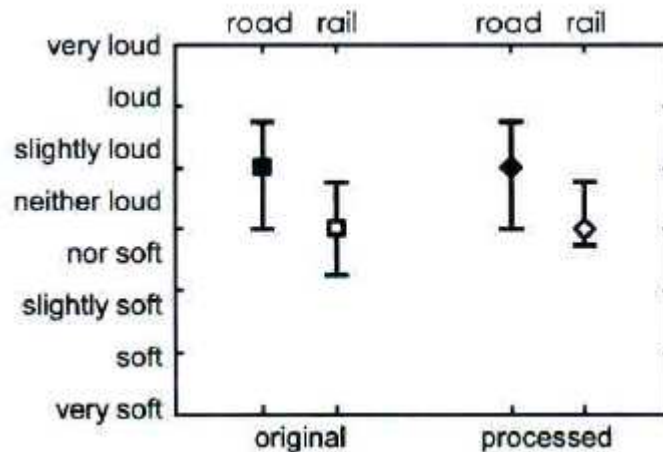


Figura 29: sensazione sonora complessiva del rumore prodotto dal traffico veicolare e dal traffico ferroviario per lo stesso  $L_{Aeq}$  per i suoni originali (quadrati) e rielaborati (rombi)

I dati riportati in Figura 29 indicano un vantaggio per l'infrastruttura ferroviaria: con  $L_{Aeq}$  pari a 55 dB(A), per il rumore prodotto dal traffico stradale la sensazione sonora complessiva è giudicata "un po' forte", mentre per il rumore ferroviario la sensazione sonora è "né forte, né silenzioso". Poiché la differenza vale anche per i suoni trasformati, dove viene oscurata l'informazione riguardo le sorgenti sonore, in questo caso gli effetti cognitivi sembrano giocare un ruolo minore.

Un altro aspetto rilevante dal punto di vista delle immissioni del rumore in campo ambientale riveste la propagazione del suono nell'ambiente esterno. La Figura 30 illustra il comportamento di diversi parametri in funzione della distanza in campo libero sulla base del rumore tonale e della banda larga. Si rende evidente il diverso comportamento dei parametri psicoacustici rispetto alla diminuzione del SPL-A.

La Figura 31 illustra il calcolo di questi parametri per un veicolo in transito registrati a diverse distanze dalla sorgente.

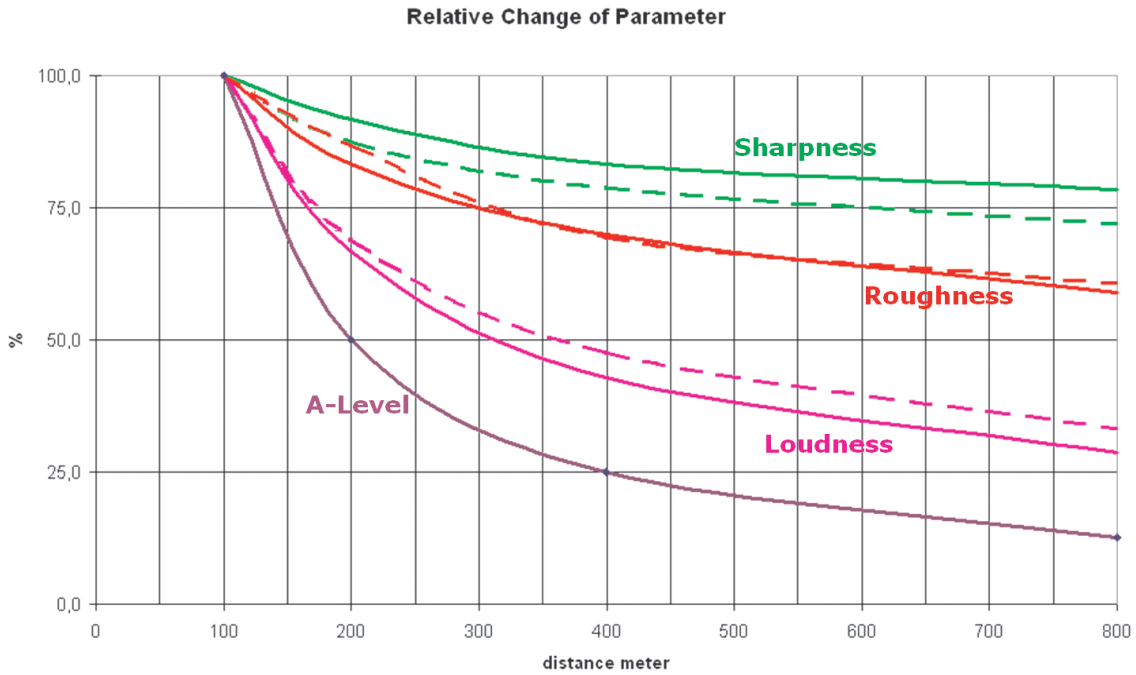


Figura 30: andamento dei parametri psicoacustici e del livello di pressione sonora pesato A in funzione della distanza, per un tono (linea continua) e per un rumore a banda larga (linea tratteggiata)

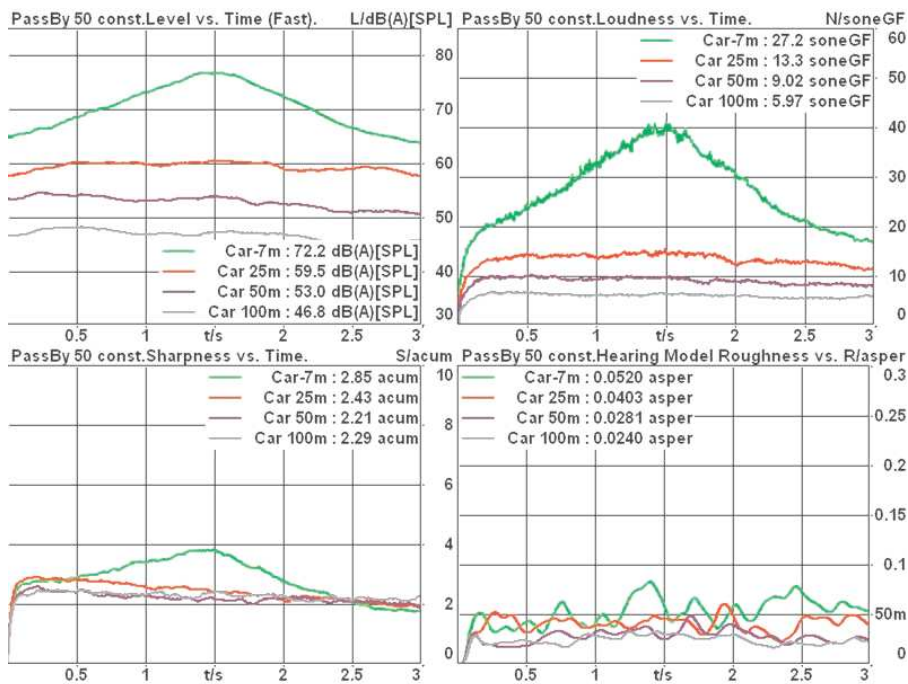


Figura 31: Analisi del pass-by di un veicolo a differenti distanze (7 m, 25 m, 50 m, 100m) SPL (A) vs. tempo, Loudness vs. tempo; Sharpness vs. tempo, Roughness vs. tempo

## 9.4 Valutazione della qualità del suono

Per quanto riguarda la valutazione della qualità del suono, oltre alle caratteristiche acustiche del segnale, l'estetica e/o gli effetti cognitivi possono svolgere un ruolo essenziale.

In situazioni di laboratorio non sempre tutti i fattori che contribuiscono al fastidio o alla piacevolezza dei suoni possono essere valutati. Tuttavia, gli elementi psicoacustici dei suoni considerati fastidiosi possono essere descritti come una combinazione di sensazioni uditive chiamate disturbo psicoacustico. Più specificatamente, un disturbo psicoacustico (PA) può descrivere quantitativamente i giudizi ottenuti negli esperimenti di psicoacustica.

Fondamentalmente, il disturbo psicoacustico dipende dalla sensazione sonora, dalla tonalità e dalla struttura temporale dei suoni. Può essere quindi definita la seguente relazione tra disturbo psicoacustico PA, la percezione uditiva della loudness N, della Sharpness S, della Fluctuation Strength F e la Roughness, R:

$$PA \approx N \left( 1 + \sqrt{w^2(S) + w^2(F, R)} \right) \quad (1)$$

In sostanza, la formula (1) evidenzia che il disturbo psicoacustico oltre alla sensazione sonora stessa, deve tener conto del contributo della nitidezza, della fluttuazione e della rugosità che devono essere presi in considerazione utilizzando una media RMS (valore quadratico medio).

Una descrizione quantitativa del disturbo psicoacustico è basata sui risultati di esperimenti psicoacustici con suoni modulati e non modulati a banda stretta e suoni a banda larga di diversa distribuzione spettrale. Quanto sopra può essere definito nel seguente modo:

$$PA = N_s \left( 1 + \sqrt{w^2(S) + w^2(F, R)} \right) \quad (2)$$

dove:

- $N_s$  è il percentile della sensazione in son;
- $w_s = (S - 1.75) \cdot 0.25 \lg(N_s + 10)$  per  $S > 1,75$  acum;
- $w_{FR} = \frac{2,18}{(N_s)^{0,4}} \cdot (0,4 \cdot F + 0,6 \cdot R)$

per descrivere l'influenza della fluttuazione  $F$  misurata in  $\text{vacil}$  e della rugosità  $R$  misurata in  $\text{asper}$ .

Per mezzo della formula (2), il disturbo psicoacustico può essere descritto, in linea con i dati degli esperimenti di psicoacustica, non solo per i suoni sintetici, ma anche per i suoni tecnologici come il rumore delle automobili, il rumore dei condizionatori d'aria, o il rumore di attrezzi come seghe circolari, trapani, ecc.

Come esempio, in Figura 32, il disturbo psicoacustico del rumore prodotto dalle automobili misurato in esperimenti di psicoacustica è confrontato con i dati calcolati secondo la formula (2). I suoni delle vetture utilizzati negli esperimenti sono elencati nella Tabella 3. I suoni provengono da vetture con motori diesel o motori a benzina, a velocità diverse nelle varie marce, e registrati a distanze diverse. Sono inclusi transiti a velocità costante, al minimo, in decelerazione, in accelerazione, in accordo con la norma ISO 362, nonché la partenza di una corsa automobilistica.

Tutti i dati sono stati normalizzati rispetto al valore del suono n. 10, un transito di una vettura con motore diesel con la quarta marcia innestata a 110 km/h, registrata ad una distanza di 7.5 m. I risultati degli esperimenti psicoacustici sono rappresentati da punti (mediane e interquartili), i valori calcolati sono indicati dalle crocette.

Il confronto dei dati illustrati in Figura 32 rivela il potenziale predittivo di quanto espresso nella formula (2) per il disturbo psicoacustico. Elevati valori di disturbo psicoacustico sono ottenuti per un inizio gara (suono n. 12), una vettura diesel ad alta velocità e marcia bassa (suono n. 3) o per un'auto diesel registrata a breve distanza (suoni n. 21 e n. 23).

In sintesi, il disturbo psicoacustico è in grado di valutare gli elementi psicoacustici legati alla qualità del suono. Tenendo conto di altri elementi come fattori estetici e/o cognitivi, le tendenze di moda in ambito acustico ecc., il disturbo psicoacustico offre un grande potenziale per l'ingegneria del suono.

Sebbene il modello di psicoacustica del disturbo proposto caratterizzi varie situazioni pratiche, non è certamente progettato per risolvere tutte le questioni di qualità del suono. Questo modello contiene alcuni rilevanti "ingredienti" per valutare la qualità di un segnale acustico, vale a dire, volume, nitidezza, rugosità e la fluttuazione. Tuttavia, l'appropriata "ricetta" per una miscela di quantità psicoacustiche può variare per diverse famiglie di suoni e diverso contesto applicativo.

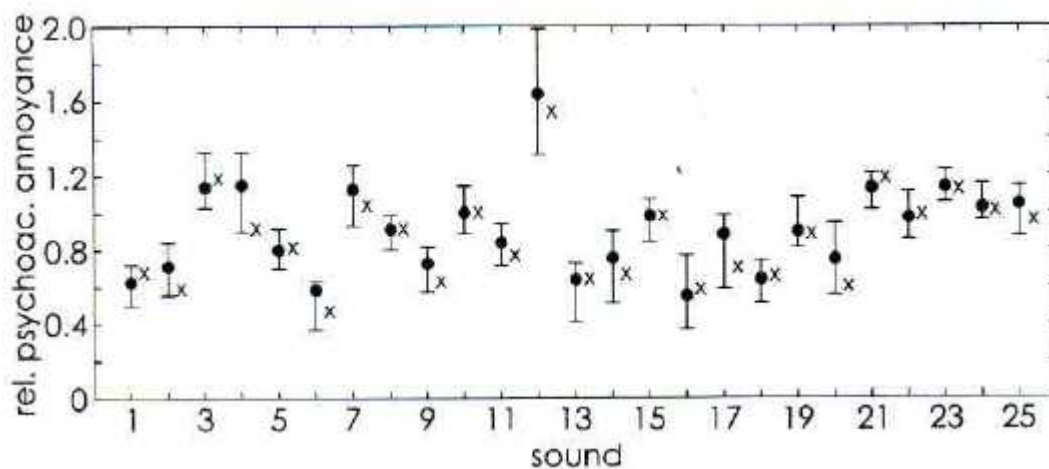


Figura 32: disturbo psicoacustico dei suoni di auto elencati nella Tabella 3.

Punti: dati provenienti da esperimenti di psicoacustica. Crocette: Valori calcolati in base alla formula (2)

| Sound | Motor  | Speed in km/h | Gear  | Distance in m |
|-------|--------|---------------|-------|---------------|
| 1     | Diesel | 60            | 3     | 7.5           |
| 2     | Otto   | 30            | 1     | 7.5           |
| 3     | Diesel | 70            | 2     | 7.5           |
| 4     | Otto   | 0             | idle  | 0.9           |
| 5     | Otto   | 80            | 3     | 7.5           |
| 6     | Otto   | 80            | 3     | 15.0          |
| 7     | Diesel | 35            | 1     | 7.5           |
| 8     | Diesel | 70            | 4     | 7.5           |
| 9     | Otto   | 50            | 2     | 7.5           |
| 10    | Diesel | 110           | 4     | 7.5           |
| 11    | Diesel | acceleration  | 1     | 7.5           |
| 12    | Diesel | racing start  | 1     | 7.5           |
| 13    | Otto   | 60            | 3     | 7.5           |
| 14    | Diesel | 30            | 1     | 7.5           |
| 15    | Otto   | 50            | 2     | 3.5           |
| 16    | /      | 60            | coast | 7.5           |
| 17    | Diesel | 0             | idle  | 7.5           |
| 18    | Diesel | 60            | 4     | 7.5           |
| 19    | Otto   | ISO 362       | 2     | 7.5           |
| 20    | Diesel | 0             | idle  | 7.5           |
| 21    | Diesel | 80            | 3     | 3.75          |
| 22    | Diesel | 50            | 2     | 3.75          |
| 23    | Diesel | 80            | 3     | 3.75          |
| 24    | Diesel | 90            | 4     | 7.5           |
| 25    | Otto   | 80            | 3     | 3.75          |

Tabella 3: suoni di autovetture utilizzati per gli esperimenti di disturbo psicoacustico

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] H. Fastl, E. Zwicker *Psychoacoustic: Facts and Models* Springer.
- [2] H. Fastl "Psychoacoustics and Sound Quality" [www.mmk.ei.tum.de/publ/pdf/05/05fas1.pdf](http://www.mmk.ei.tum.de/publ/pdf/05/05fas1.pdf).
- [3] International Standard ISO 131, 1979 Acoustics - Expression of Physical and Subjective Magnitudes of Sounds and Noise in Air-Normal Equal-Loudness Level Contours.
- [4] International Standard ISO 532, 1975 Acoustics – Method for Calculation Loudness Level.