

Corso di Laurea Triennale in

Tecniche della Prevenzione nell'Ambiente e nei Luoghi di Lavoro

Tesi di Laurea in Sicurezza nei Luoghi di Lavoro

Mitigazione della percezione del rumore dei fancoils mediante informational masking

A.A. 2023/2024

Napoli, 28 novembre 2024

*A mio nonno Gennaro, stella che illumina il mio cammino.
Ti sento accanto a me quando il mio sguardo riconosce la bellezza di questo mondo.
Per i ricordi e gli insegnamenti che hai lasciato custoditi, in eterno, nel mio cuore.*

*Ai miei genitori Mimma e Cosimo, colonne portanti della mia vita,
che hanno forgiato la mia anima più di chiunque altro.
Per l'amore che mi dimostrate ogni giorno nelle piccole e grandi cose.
Per avermi insegnato la costanza, il sacrificio e i valori più nobili.
Per essere contemporaneamente il mio faro e la mia ancora.
Il mio nido e le mie ali per spiccare il volo.*

*A mio fratello Raffaele, "animae dimidium meae".
Per essere la luce e il colore che plasmano la mia vita.
Il dono più prezioso che avessi mai potuto ricevere.
Il mio punto di riferimento e la mia fonte di ispirazione.
Divisi siamo fragili come un cristallo, ma uniti siamo forti come un diamante.
Insieme saremo come gli scogli che, imperturbabili, resistono alle onde del mare.*

A voi dedico questo traguardo, perché ne siete fautori.

Introduzione.....	3
CAPITOLO I.....	5
Il suono	5
1.1 Natura del fenomeno sonoro	5
1.2 Le caratteristiche del suono	6
1.3 Il rumore.....	8
1.4 La scala logaritmica dei decibel e i livelli sonori	9
1.5 Curve isofoniche.....	10
1.6 Le curve di ponderazione	11
1.7 Le grandezze psicoacustiche.....	13
1.8 Il mascheramento del rumore	14
CAPITOLO II.....	15
Cenni di anatomia e fisiologia dell'apparato uditivo.....	15
2.1 L'apparato uditivo.....	15
2.1.1 L'orecchio esterno	16
2.1.2 L'orecchio medio	16
2.1.3 L'orecchio interno.....	17
CAPITOLO III	18
Effetti del rumore sull'organismo umano	18
3.1 Effetti uditivi	18
3.2 Effetti extra-uditivi.....	21
CAPITOLO IV	24
Riferimenti normativi	24
4.1 Normativa relativa al rumore nei luoghi di lavoro	24
4.2 Normativa relativa all'esposizione al rumore negli edifici.....	26
CAPITOLO V.....	29
Il comfort acustico negli uffici	29
5.1 Comfort acustico: definizione	29
5.2 Primi studi relativi al comfort acustico negli uffici.....	29
5.2.1 Valutazione della percezione del rumore in ufficio	31
5.3 Indici e descrittori della rumorosità indoor.....	31
5.3.1 Livello sonoro continuo equivalente (L_{Aeq})	31
5.3.2 Speech Interference Levels: SIL e PSIL.....	32
5.3.3 Curve NC "Noise Criteria" ed NCB "Balaced Noise Criteria":	32
5.3.4 Curve RC "Room Criteria"	33
5.3.5 RC MARK II ed indice QAI "Quality Assesment Index"	33

CAPITOLO VI	34
La rumorosità degli impianti di condizionamento.....	34
6.1 Funzionamento degli impianti.....	34
6.2 Rumorosità dei fan coil e strategie per la riduzione del rumore	35
CAPITOLO VII.....	37
Sperimentazione.....	37
7.1 Obiettivi dello studio	37
7.2 Materiali e metodi	37
7.2.1 Registrazioni in situ.....	37
7.2.2 Calibrazione	39
7.2.3 Noise Sensitivity Questionnaire (NoiSeQ)	43
7.2.4 Test della risposta soggettiva al rumore dei fan coil	46
7.2.5 Sessione sperimentale	46
CAPITOLO VIII	48
Risultati	48
8.1 Risultati NoiSeQ Questionnaire	48
8.2 Risultati test sperimentale.....	49
CAPITOLO IX.....	53
Conclusioni.....	53
Allegati.....	54
Bibliografia.....	58

Introduzione

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) definisce la salute come “non semplicemente l'assenza di malattia o infermità” in senso stretto, ma in senso più ampio come “uno stato di completo benessere fisico, mentale e sociale” [1]. Ne consegue, non soltanto la necessità di garantire condizioni ambientali in grado di escludere l'insorgenza di danni biologici all'organismo umano, ma anche incapaci di inficiare la condizione di benessere degli individui, in tutte le sue espressioni.

Il rumore è uno *stressor* ambientale che caratterizza gran parte delle attività umane e costituisce una notevole insidia per la salute ed il benessere delle persone che ne sono esposte. È infatti noto che, oltre alla perdita dell'udito, il rumore può indurre molteplici effetti extrauditivi di natura soggettiva [2].

Diversi studi in ambito scientifico hanno indagato la risposta soggettiva al rumore. In particolare, da uno studio condotto su un gruppo cospicuo di lavoratori, impiegati in uffici, laboratori e industrie, è emersa una correlazione tra rumore a bassa frequenza, e stanchezza e fatica al termine del turno di lavoro. Nonché una correlazione tra rumore ed effetti di disturbo o annoyance [3]. La risposta soggettiva al rumore include anche effetti di carattere emotivo (insorgenza di sentimenti negativi quali paura, frustrazione e abbandono), comportamentale (tendenza all'irritabilità) e sociale (isolamento). Al manifestarsi di tali effetti contribuiscono anche la suscettibilità individuale al rumore e l'assuefazione allo stimolo stressogeno.

Al fine di indagare la risposta soggettiva al rumore in un possibile contesto lavorativo, proponendo l'utilizzo di strategie di mitigazione, è stata considerata una particolare tipologia di ambiente interno, ovvero gli ambienti adibiti ad ufficio, ed è stato considerato il rumore dei ventilconvettori, o fan coil, come tipologia di sorgente di rumore.

Per l'acquisizione dei dati sono state eseguite una serie di registrazioni in situ. In seguito, è stata valutata la sensibilità di un gruppo di soggetti mediante l'utilizzo di un questionario. Successivamente, è stato condotto un test sperimentale d'ascolto allo

scopo di valutare la risposta soggettiva dei partecipanti al rumore prodotto dai fan coil, ed a sue combinazioni con suoni d'acqua.

CAPITOLO I

Il suono

1.1 Natura del fenomeno sonoro

Dal punto di vista fisico, il suono è definito come una perturbazione di natura ondosa che si propaga in un mezzo elastico (solido, liquido o gas) con una velocità ed una frequenza tali da essere percepibile dall'orecchio umano. Quando una sorgente sonora trasmette vibrazioni in un fluido, queste si diffondono nel mezzo circostante, provocando una serie di compressioni e rarefazioni delle particelle d'aria, che oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio, senza trasporto di materia ma solo di energia. Questo si traduce in una variazione della pressione rispetto alla pressione atmosferica media e si avverte quello che l'essere umano percepisce come un suono [4].

L'oscillazione meccanica che caratterizza il fenomeno sonoro può essere rappresentata da un'onda di tipo "sinusoidale" e descritta dalle seguenti grandezze fisiche:

- Frequenza (f): è il numero di oscillazioni compiute da un'onda in un secondo (s), la sua unità di misura è l'Hertz (Hz);
- Periodo (T): è il tempo impiegato dall'onda per compiere un'oscillazione completa;
- Lunghezza d'onda (λ): è l'intervallo tra due massimi di due onde consecutive, la sua unità di misura è il metro (m);
- Ampiezza (A): è la massima oscillazione dell'onda, si misura in Watt (W) [5].

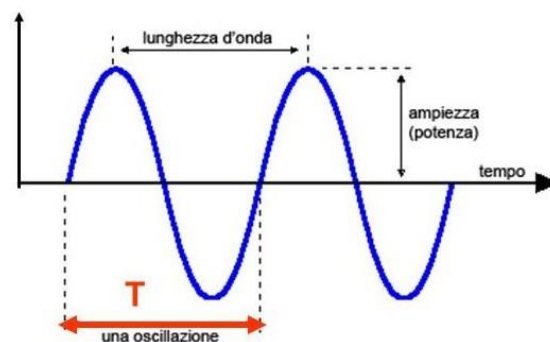


Figura 1 Rappresentazione di un suono puro

Un'onda sinusoidale può rappresentare un suono caratterizzato da frequenza costante e da un'ampiezza uniforme, un suono con queste caratteristiche è detto *suono puro*, ovvero un suono ideale che raramente trova rappresentazione in natura. I suoni che si riscontrano nella realtà sono suoni complessi generati dalla combinazione di diverse frequenze. Quando un suono complesso è caratterizzato da una frequenza ben definita e da una precisa periodicità si tratta di un suono periodico. Invece, quando il suono è caratterizzato da una mancanza di periodicità e da frequenze del tutto incoerenti tra loro, si dice aperiodico, si tratta cioè di un rumore.



Figura 2 *Rappresentazione grafica del rumore*

1.2 Le caratteristiche del suono

Il suono è identificabile attraverso le seguenti caratteristiche:

- Altezza
- Timbro
- Intensità
- Durata

L'altezza o pitch è ciò che differenzia un suono "acuto" da un suono "grave" ed è determinato dalla frequenza (f) ovvero dal numero delle oscillazioni compiute in un secondo (s), ed esattamente come la frequenza, si misura in Hz.

Maggiore è la frequenza, maggiore sarà il numero di oscillazioni e più il suono sarà “alto” ovvero *acuto*. Viceversa, ad oscillazioni lente corrisponde una frequenza minore, quindi il suono risulterà “basso” o *grave*.

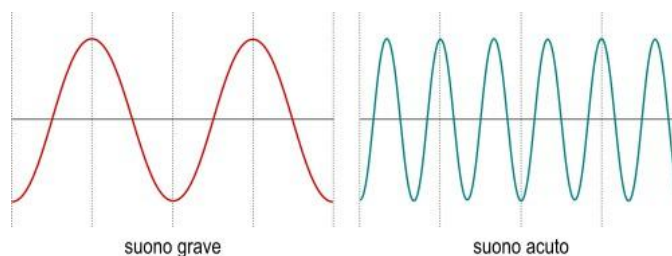


Figura 3 Rappresentazione grafica suono grave ed acuto.

Il timbro differenzia il suono in base al profilo spettrale e temporale, esso dipende dalla forma e dalla dimensione dell’oggetto sonoro, dal materiale di cui esso è costituito ed infine dal modo in cui è stato prodotto il suono. Si tratta, per esempio della caratteristica che permette di distinguere le note degli strumenti musicali.

L’intensità permette di distinguere un suono *forte* ovvero “ad alto volume”, da un suono *debole* o “a basso volume” e si misura in W/m^2 . L’intensità del suono dipende dalla sua potenza e cresce in base all’ampiezza dell’onda. Le onde sonore con ampiezze maggiori generano perturbazioni dell’aria più marcate rendendo il suono maggiormente udibile.

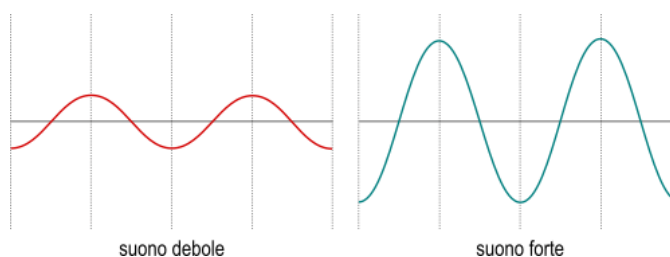


Figura 4 Rappresentazione grafica suono debole e forte

La durata di un suono è il periodo di tempo in cui perdurano le vibrazioni emesse dall’onda sonora. In base alla durata si distinguono suoni *brevi* o *lunghi*.

1.3 Il rumore

Il rumore è un “suono sgradevole” ed “indesiderato” che può interferire con le condizioni di benessere ambientale, agire con effetti di *mascheramento* sulla comprensione della parola e, in generale, agire come stressor ambientale aspecifico. Fenomenologicamente il suono è il prodotto della diffusione disarmonica di onde aventi pressione sonora, ampiezza e frequenza differenti [5].

In base alla sua evoluzione nel tempo, il rumore può essere:

- Continuo: è un rumore costante nel tempo, che presenta variazioni di intensità inferiori a 3dB;
- Fluttuante: è un rumore caratterizzato da aumenti e riduzioni, con oscillazioni maggiori di 3dB;
- Intermittente: è un rumore intervallato da momenti di quiete maggiori di 1 secondo, può essere da impatto o esplosivo;
- Impulsivo: è un rumore caratterizzato da variazioni del livello sonoro inferiori ad 1 secondo.

I rumori presenti negli ambienti di vita e di lavoro, poiché provengono da più sorgenti non sono mai di un unico tipo, ma presentano un’alternanza nel tempo (rumori a banda larga). Per questo motivo è determinante valutarne il valore energetico medio sottoforma di Livello sonoro equivalente (L_{eq}) come indicato nel sottoparagrafo successivo.

Inoltre, a tal proposito ed anche ai fini di un’eventuale stima del danno, si distinguono due categorie di rumore:

- Rumore dannoso: che comporta il raggiungimento in funzione del tempo e dell’intensità, dei valori limite di esposizione.
- Rumore disturbante: che indipendentemente dal livello e dalla durata dell’esposizione, determina una condizione di reattività negativa dell’individuo esposto.

1.4 La scala logaritmica dei decibel e i livelli sonori

La sensazione sonora può essere espressa in termini di Intensità (Watt/m^2) oppure in termini di Pressione, misurata in Pascal (Pa) [6].

L'orecchio umano mediamente è in grado di percepire suoni ad un valore minimo di pressione di $20\mu\text{Pa}$, fino alla soglia del dolore pari a 100 Pa . Tuttavia, già un valore di 60Pa induce sensazione di panico, e valori ancora maggiori provocano danni uditivi immediati e irreversibili.

Dunque, il campo di valori entro il quale varia la pressione sonora udibile si estende su oltre sei ordini di grandezza e, considerando che la risposta soggettiva appare maggiormente correlata all'energia, il campo di valori diventa dell'ordine di 10^{12} (il quadrato della pressione sonora).

Di conseguenza, si è preferito rappresentare le variazioni di tali grandezze, non su una scala lineare bensì su una scala compressa, di tipo logaritmico. Questo, per evitare di trattare con uno spettro di numeri eccessivamente esteso ed inoltre perché l'enorme capacità dinamica dell'orecchio umano, non può essere espressa in termini assoluti.

La scala logaritmica permette di confrontare i valori della grandezza in esame con i valori convenzionali della stessa grandezza, assunti come riferimento. Il logaritmo decimale rappresenta il livello rispetto al valore di riferimento della stessa grandezza, espresso in decibel (dB).

“Livello di pressione sonora” è definito dalla relazione:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB}$$

dove:

- p_0 è uguale al valore di riferimento della pressione sonora, convenzionalmente uguale a $20\mu\text{Pa}$ (corrispondenti a 0 dB);
- p è uguale al valore efficace della pressione sonora.

Analogamente il “Livello di potenza sonora”, si può definire come:

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ dB}$$

dove:

- W_0 equivale alla potenza sonora di riferimento, convenzionalmente uguale a 10^{-12} W (cioè, 1 pW);
- W equivale alla potenza sonora.

Il livello sonoro equivalente L_{eq} è il livello di un ipotetico rumore costante che, se sostituito al rumore reale per lo stesso intervallo di tempo T , comporterebbe la stessa quantità totale di energia sonora all’orecchio. Attraverso il livello equivalente è possibile esprimere con un unico valore il livello sonoro relativo ad una determinata sorgente di rumore.

È calcolato mediante l’equazione:

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ dB}$$

1.5 Curve isofoniche

I segnali acustici non arrivano all’orecchio tal quali ma sono trasformati dall’apparato uditivo in impulsi nervosi, che raggiungono il cervello, generando la sensazione sonora.

Con il termine inglese “*loudness*” tradotto in italiano con il significato di “sensazione sonora” si fa riferimento alla “caratteristica di un suono in base alla quale esso è giudicato più o meno intenso da un ascoltatore” si tratta quindi di una risposta soggettiva in relazione ad un parametro oggettivo come l’intensità.

Il tentativo di misurare la sensazione sonora ha condotto nel corso degli anni alla realizzazione della prima famiglia di “curve isofoniche” per ascolto binaurale in cuffia, create da Fletcher e Munson nel 1933. Le curve furono ottenute alternando ad una serie

di toni puri di diversa frequenza e intensità, un suono di riferimento di frequenza 1 Hz. Tali curve permettono di ottenere il “livello di sensazione sonora”, la cui unità di misura è il phon. Un phon è definito come “il livello di pressione sonora del suono di riferimento, per cui la sensazione sonora è uguale a quella del suono puro in esame”.

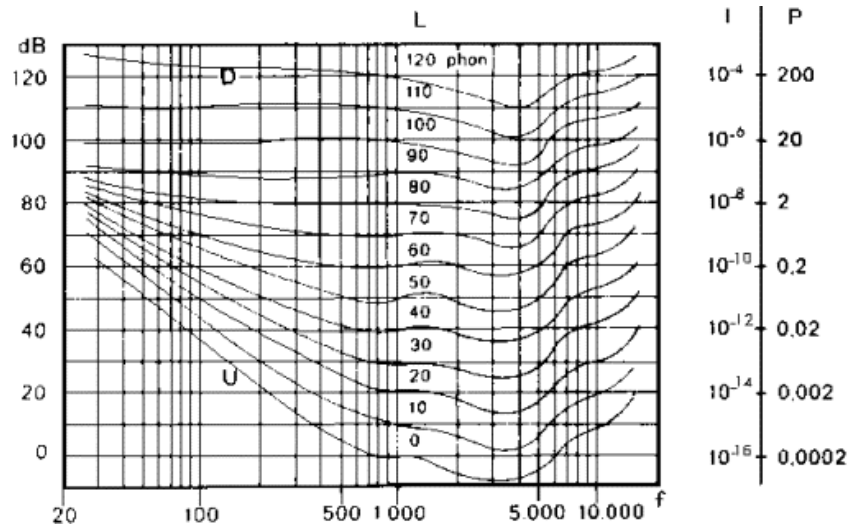


Figura 5 Curve isofoniche di Fletcher e Munson

La normativa internazionale per molti anni ha adottato come riferimento le curve isofoniche per ascolto binaurale di Fletcher e Munson, mentre l'attuale normativa (UNI EN ISO 226, 2007) adotta come riferimento le curve realizzate da Robinson e Dadson nel 1956, le quali presentano i toni puri prodotti direttamente in campo libero con un altoparlante [7]

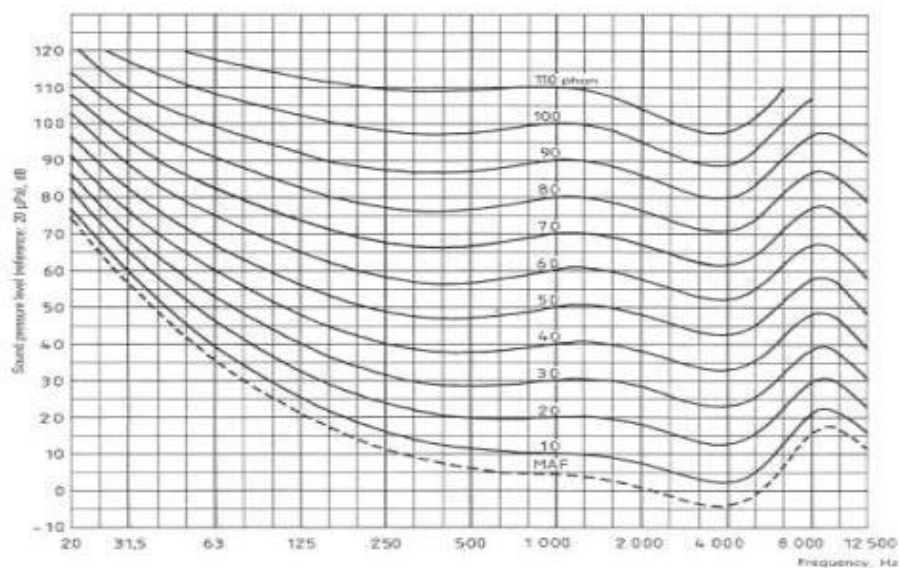


Figura 6 Curve isofoniche norma ISO 226

Il campo di udibilità dell'essere umano copre un range di frequenza compreso tra 20Hz e 20kHz ed intensità da 0 e 120dB. I suoni con frequenza inferiore a 20Hz sono detti *infrasuoni* mentre i suoni con frequenza superiore a 20kHz sono detti *ultrasuoni*.

La sensibilità uditiva varia al variare della frequenza, questa è maggiore nell'area compresa tra 300 e 3000Hz, corrispondenti alle frequenze del linguaggio parlato ed è minore alle basse frequenze rispetto che alle medie e alte frequenze.

Negli strumenti di misurazione del rumore, al fine di riprodurre il più fedelmente possibile il comportamento dell'orecchio umano si utilizzano dei filtri di ponderazione che attenuano le componenti acustiche per cui quest'ultimo ha ridotta sensibilità.

Dunque, sono state normalizzate tre curve di ponderazione in frequenza: A, B, C, realizzate sulla base delle curve isofoniche di Fletcher e Munson rispettivamente a 40, 70 e 100 phon.

La curva di ponderazione A (che attenua le frequenze inferiori a 1 kHz ed esalta quelle tra 1 e 5 kHz) risponde maggiormente all'esigenza di riprodurre la risposta psicofisica dell'orecchio ed è la più utilizzata per la misura del rumore sia in ambiente esterno sia nei *luoghi di lavoro*. Infatti, è la curva adottata dal Decreto Legislativo n. 81 del 2008 e s. m. i. per determinare il livello di esposizione al rumore (L_{EX}) giornaliero e settimanale [8].

La curva di ponderazione B è ormai in disuso.

La curva di ponderazione C è utilizzata in caso di livelli di pressione sonora elevati ove si riscontri la presenza di componenti impulsive; è adottata dal Decreto Legislativo n. 81 del 2008 e s. m. i. per determinare la pressione acustica di picco L_{pick} .

In seguito, alle tre curve di cui sopra, si è aggiunta anche una quarta curva: la curva di ponderazione D. Questa è specifica per valutare il rumore prodotto da aerei supersonici di tipo militare.

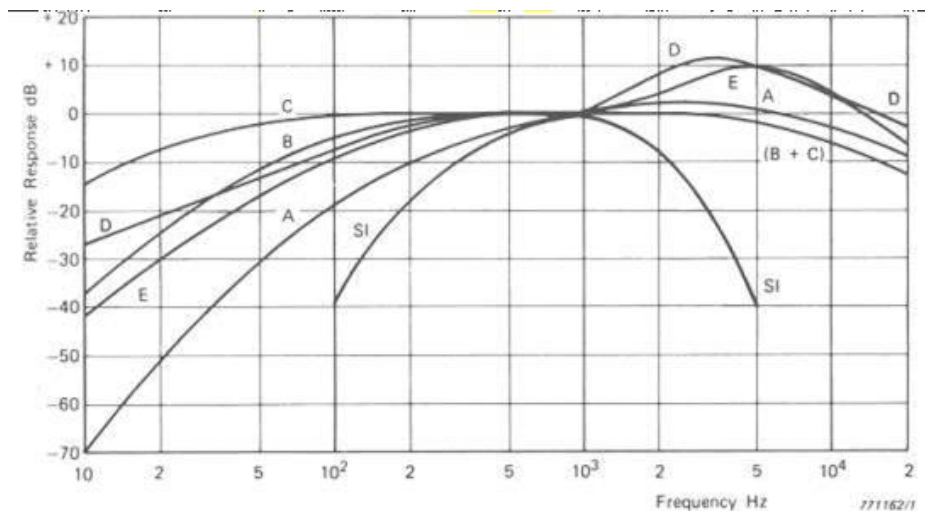


Figura 7 Curve di ponderazione

1.7 Le grandezze psicoacustiche

La psicoacustica studia la percezione del suono, in particolar modo si occupa di analizzare le relazioni tra le proprietà fisiche del suono e le risposte psicologiche e fisiologiche degli individui. Nell'affrontare l'aspetto percettivo è necessaria la definizione di nuove grandezze, oltre a quelle fisiche, che permettano di quantificare gli attributi soggettivi del suono.

Oltre alla loudness, le grandezze psicoacustiche fondamentali sono:

- **Sharpness (S);**
- **Roughness (R);**
- **Fluctuation strenght (F).**

Dal momento che la valutazione di tali grandezze mediante esperimenti, richiede molto tempo, sono stati creati modelli che forniscono stime dell'entità di tali grandezze a partire da dati fisici.

La **sharpness** è il valore della sensazione sonora causata delle alte frequenze, si misura in acum. Il valore di 1 acum è attribuito ad un rumore a banda stretta di 1Hz, della larghezza di 150Hz e del valore di 60 dB. Un valore corretto di sharpness può risultare

gradevole in quanto conferisce al suono un carattere di maggiore potenza, mentre un valore troppo elevato rende il suono aggressivo.

La **roughness** è una sensazione dell'udito che viene creata dalle modifiche relativamente rapide prodotte dalle frequenze di modulazione nella regione tra circa 15 e 300 Hz, raggiunge il massimo a frequenze di modulazione di 70 Hz e diminuisce a frequenze più elevate, si misura in asper.

La **fluctuation strenght** è simile alla roughness ma raggiunge il massimo a frequenze di modulazione di circa 4 Hz, si misura in vacil. La fluctuation strenght gioca un ruolo cruciale nella valutazione della percezione del parlato. Infatti, anche una conversazione fluente raggiunge il massimo intorno ad una frequenza di modulazione di 4 Hz, corrispondente alla frequenza delle sillabe pronunciate al secondo e alla frequenza a cui l'udito umano è più sensibile [9].

1.8 Il mascheramento del rumore

L'introduzione di suoni naturali per ridurre l'intensità ed attenuare il fastidio provocato da suoni sgradevoli ed indesiderati è un aspetto ampiamente studiato in acustica, soprattutto per il rumore ambientale. Questo fenomeno prende il nome di mascheramento.

Riguardo i suoni esistono due tipologie di mascheramento:

- *Mascheramento energetico*: che serve per coprire il suono
- *Mascheramento informativo-attenzionale*: che non copre il suono ma distoglie l'attenzione dell'ascoltatore (I suoni cosiddetti "naturali", come il cinguettio degli uccelli, dello scorrere di un corso d'acqua o delle onde del mare possono determinare questo tipo di mascheramento).

CAPITOLO II

Cenni di anatomia e fisiologia dell'apparato uditivo

2.1 L'apparato uditivo

Al fine di indagare sulla natura degli effetti del rumore e di altri agenti ototossici sull'udito, e di proteggere i lavoratori esposti, è necessario conoscere i principali meccanismi che regolano la funzione uditiva.

L'apparato uditivo è la struttura anatomica che consente di convertire l'energia meccanica delle onde sonore in "segnali elettrici" i quali, mediante il nervo acustico, vengono veicolati al cervello dando luogo alla sensazione sonora.

Il sistema uditivo periferico è distinto in tre parti: *orecchio esterno*, *orecchio medio*, *orecchio interno*, quattro, se consideriamo la parte del *sistema nervoso periferico* che contribuisce alla funzione uditiva. In seguito agli elementi periferici agisce anche la parte del *sistema nervoso centrale* deputata alla trasmissione e alla decodifica dei segnali acustici.

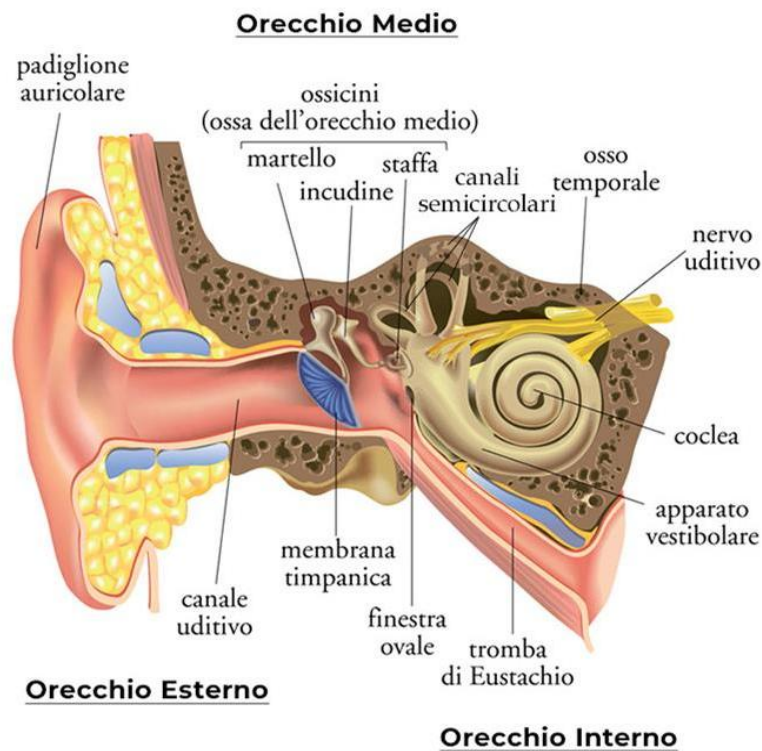


Figura 8 Anatomia dell'apparato uditivo

2.1.1 L'orecchio esterno

L'orecchio esterno comprende il *padiglione auricolare*, che localizza ed intercetta le onde sonore convogliandole verso il *condotto uditivo esterno*, che a sua volta le diffonde verso la *membrana timpanica*. Il canale uditivo inoltre assolve una funzione di protezione dell'orecchio medio, grazie alla sua conformazione curva, la sua lunghezza (circa 25 mm), la presenza di corti peli al suo interno, chiamati *tragi*, e alle secrezioni prodotte dalle ghiandole ceruminose e sebacee che trattengono il pulviscolo atmosferico.

2.1.2 L'orecchio medio

L'orecchio medio consente la trasmissione dei suoni dal condotto uditivo esterno alla coclea. È formato dalla *membrana timpanica* e dalla *catena ossiculare*; la quale è costituita da tre ossicini ovvero; *martello*, *incudine* e *staffa*. Questi hanno un ruolo fondamentale nel processo di percezione del suono in quanto connettono la membrana del timpano con un'altra membrana, che costituisce la parte terminale dell'orecchio medio, la cosiddetta *finestra ovale*. Sulla finestra ovale si concentra tutta l'energia sonora, evitandone la dispersione da uno stadio a bassa impedenza - l'aria - ad uno stadio ad alta impedenza - l'orecchio interno. In questo modo l'orecchio medio funge da *trasformatore di impedenza acustica* permettendo che le vibrazioni sonore raggiungano correttamente l'orecchio interno.

A monte della cavità dell'orecchio medio si trova la *tuba o tromba di Eustachio* che, attraverso un lungo condotto, collega l'orecchio medio al rinofaringe. Questa struttura consente di eguagliare la pressione dell'aria su entrambe le facce della membrana timpanica, permettendo un buon funzionamento dell'udito, anche a seguito di rapide variazioni della pressione atmosferica come nel caso di decolli aerei o immersioni subacquee. La tuba uditiva costituisce inoltre, una protezione dell'orecchio medio da eventuali agenti patogeni presenti nel rinofaringe, nonché un meccanismo di drenaggio di muco ed eventuali secrezioni patologiche dell'orecchio medio [10].

2.1.3 L'orecchio interno

L'orecchio interno è formato da due parti ben distinte, il *complesso vestibolare*, non coinvolto direttamente nel processo uditivo, ma deputato alla gestione dell'equilibrio; e la *coclea*, che è invece deputata alla funzionalità uditiva.

La *coclea* è un organo molto sensibile dell'orecchio, essa possiede una caratteristica forma a chiocciola, al suo interno si trova un liquido chiamato *perilinf*a. La coclea è dotata di una membrana elastica, detta *membrana basilare* al cui interno si verifica il passaggio della perilinf

Sulla membrana basilare è presente l'*organo di Corti* ovvero il principale recettore dell'onda sonora; esso è costituito da due tipi di cellule, le *cellule di sostegno* e le *cellule sensoriali o acustiche*, queste ultime sono dotate di ciglia per cui sono anche dette *ciliate*.

Le cellule ciliate sono responsabili dell'amplificazione e della trasduzione del segnale acustico in impulso nervoso. L'impulso nervoso viene recepito a livello cocleare dalle fibre nervose del *nervo acustico* che lo trasportano alla *corteccia temporale* dove si genera la sensazione uditiva, quest'ultima è favorita anche dai recettori *tonotopici* situati a livello cocleare, in particolare; le cellule acustiche situate alla base della coclea, recepiscono frequenze più alte; mentre quelle situate all'apice recepiscono frequenze più basse.

CAPITOLO III

Effetti del rumore sull'organismo umano

Gli effetti avversi del rumore a carico dell'organismo possono essere distinti in effetti uditivi ed effetti extrauditivi, a seconda che incidano direttamente sull'udito ovvero comportino alterazioni e anomalie a carico di altri organi e apparati.

3.1 Effetti uditivi

Il danno da rumore a carico dell'apparato uditivo è proporzionale all'energia sonora complessiva che colpisce l'orecchio, l'entità del danno è funzione dell'intensità, della durata e della frequenza dell'esposizione nonché della suscettibilità individuale. In particolare, i danni uditivi si distinguono:

- Modificazioni reversibili o irreversibili per trauma acustico acuto;
- Modificazioni irreversibili per trauma acustico cronico (sordità o ipoacusia da rumore) [11].

La prima struttura ad essere alterata a seguito dell'esposizione a rumore è la coclea; dunque, il danno è di tipo percettivo. Una esposizione di breve durata determina un innalzamento della soglia uditiva (*fatica uditiva*), che può essere transitorio o permanente.

- Innalzamento transitorio della soglia uditiva: può insorgere già a partire da un livello di rumore superiore a 70-75 dB(A). Se la capacità uditiva della persona torna alla normalità, a seguito di un breve periodo di riposo in un luogo silenzioso, la perdita dell'udito è reversibile.
- Innalzamento permanente della soglia uditiva: se l'esposizione è prolungata e l'intensità del rumore aumenta (85-90 dB(A)) l'innalzamento della soglia uditiva diventa permanente, e può causare la perdita irreversibile dell'udito [12].

Infatti, il danno a livello delle strutture cocleari può progredire fino alla definitiva distruzione delle cellule sensoriali uditive (ciliate) che, in quanto cellule

neurosensoriali non sono in grado di rigenerarsi, come avviene per altri tipi di cellule. Questo significa che, una volta manifestato il danno non può verificarsi regressione, ma se ne può solo impedire il peggioramento. Ne consegue che l'unico modo per evitare la perdita dell'udito è prevenirne il rischio.

Per *ipoacusia*, si intende un deficit più o meno marcato della funzione uditiva; essa può essere di tre tipi:

- Ipoacusia di tipo trasmissivo: legata ad alterazioni morfologiche, traumatiche, e più spesso infiammatorie dell'apparato uditivo
- Ipoacusia di tipo percettivo o neurosensoriale: dovuta ad alterazioni a carico dell'apparato di percezione; quali organo di Corti, nervo acustico, centri e vie encefaliche, aree uditive corticali
- Ipoacusia di tipo misto: dipende da fattori che agiscono sia sull'apparato di trasmissione che su quello di percezione

L'*ipoacusia da rumore* può essere causata da:

- Esposizione ad un rumore incidentale di elevata intensità, ovvero a seguito di un *trauma acustico acuto*;
- Esposizione continuativa in ambienti con elevata rumorosità, ossia in presenza di un *trauma acustico cronico*.

L'*ipoacusia da trauma acustico acuto* è solitamente monolaterale e asimmetrica, può insorgere a causa di un rumore impulsivo molto breve ed intenso (uguale o superiore a 140 dB(C), [13] ad esempio assimilabile ad uno scoppio o un'esplosione, che provoca congestione e rottura della membrana del timpano.

L'*ipoacusia da trauma acustico cronico* è di tipo percettivo, in quanto danneggia le strutture deputate alla decodifica e alla trasmissione dell'impulso sonoro al cervello. Il danno è localizzato in corrispondenza dell'organo di Corti (nelle fasi iniziali sono danneggiate le cellule ciliate esterne, poi le cellule ciliate interne ed infine le fibre nervose del nervo cocleare). L'*ipoacusia da trauma acustico cronico* è riconoscibile in quanto si presenta in forma bilaterale e simmetrica, ovvero si presenta ad entrambe le orecchie ed in modo uniforme. Inizialmente interessa i toni acuti, tra i 3000 e i 6000 Hz, con un picco di perdita uditiva intorno ai 4000 Hz, negli stadi più avanzati può estendersi anche ad altre frequenze, in questo senso il grado di ipoacusia può essere

distinto in lieve, moderato o grave.

Negli ambienti di lavoro, l'esposizione prolungata a rumori ad elevata intensità (superiori ad 80 dB(A)) può comportare ipoacusia da trauma acustico cronico. Le ipoacusie da rumore sono tra le malattie professionali maggiormente denunciate all'INAIL a tal proposito si rimanda alla nuova tabella delle malattie professionali nell'industria e nell'agricoltura di cui all'art 5 e 211 del D.P.R. 1124/ 1965 e s. m. i. [14].

La patologia insorge quasi sempre secondo uno schema regolare, che possiamo sintetizzare in quattro fasi:

- **Fase 1:** si manifesta un deficit uditivo asintomatico, in quanto limitato alle alte e medie frequenze
- **Fase 2:** insorgenza di sintomatologia soggettiva, tra cui acufeni e talvolta vertigini
- **Fase 3:** si comincia a percepire una leggera sordità in specifiche situazioni (ad es. durante conversazioni telefoniche o mentre si guarda la TV)
- **Fase 4:** la sordità è avvertita nettamente

Da non sottovalutare sono anche gli effetti secondari della perdita dell'udito, quali riduzione dell'attenzione, aumento di incidenti e cadute (ad es. per il mancato ascolto di un allarme o per la perdita del senso dell'equilibrio) con un aumentato rischio di lesioni e decessi. A questi si aggiungono le implicazioni sul benessere e sulla qualità della vita, infatti, una delle manifestazioni più significative dell'ipoacusia è l'incapacità di comprendere il parlato, ciò può avere effetti significati sulla vita di comunità e favorire l'isolamento sociale.

In relazione alla perdita dell'udito da esposizione acuta o cronica, spesso si può verificare un cambiamento nella percezione del suono, con sensazioni di ronzio o sibilo nelle orecchie, che non può essere attribuito a una fonte esterna. Questa condizione è denominata *acufene* e persiste negli individui colpiti per periodi prolungati determinando inoltre disturbi del sonno, depressione o incapacità di mantenere l'attenzione.

3.2 Effetti extra-uditivi

Gli effetti extra uditivi dovuti all'esposizione al rumore si dividono in:

- *Effetti a breve termine*, in particolare le cosiddette “reazioni di allarme” che comprendono alterazioni a carico dei muscoli, della funzione respiratoria e cardiaca, e della vista. Queste reazioni sono generalmente improvvise e durano da pochi minuti ad ore.
- *Effetti a lungo termine*, tra questi si distinguono effetti di tipo psichico, effetti di tipo neurologico ed effetti a livello endocrino
- *Effetti psicosociali*, tra questi rientrano disturbi del sonno, interferenza sulla comprensione della parola e di altri segnali acustici, influenza sul rendimento, sull'efficienza, sull'attenzione e sull'apprendimento, *annoyance*.

L'esposizione acuta a rumore di diversa natura si associa all'attivazione del sistema nervoso autonomo e del sistema endocrino. Infatti, il rumore può indurre una stimolazione a livello dell'asse ipotalamo-ipofisi-surrene che stimola la produzione di ormoni dello stress (tra cui catecolamine e glucocorticoidi).

Sul sistema nervoso il rumore può innescare un processo di risposta indiretto, inducendo reazioni di stress emotivo, dovute al disagio percepito, oppure una risposta diretta, causando uno stress fisiologico non cosciente, dovuto ad un'interazione tra il sistema uditivo centrale ed altre regioni del sistema nervoso centrale. [15].

È stato dimostrato che condizioni di stress o di allarme dovuti ad un evento stressogeno, determinano l'attivazione del sistema nervoso simpatico con conseguente aumento della secrezione sudoripara e della conduttanza cutanea (attività elettrodermica della pelle) [16-17].

L'esposizione cronica è associata ad uno squilibrio omeostatico, che provoca variazioni del metabolismo ed un aumento dei fattori di rischio solitamente associati a malattie cardiovascolari (quali aumento della pressione sanguigna, delle concentrazioni di colesterolo e glucosio nel sangue).

Sono stati effettuati diversi studi sugli effetti extra-uditivi derivati dall'esposizione al rumore, utilizzando diverse scale e metodi. In una recente indagine riguardo i limiti di

esposizione professionale per gli effetti extra-uditivi sono stati misurati i livelli equivalenti di esposizione al rumore in diversi contesti di lavoro, tenendo in considerazione sia ambienti industriali, sia uffici chiusi, con un range di livello equivalente misurato tra 65 e 80 dB(A). Inoltre, sono stati registrati parametri psicofisiologici di soggetti esposti anche a livelli di rumore inferiori, con variazioni da 55 a 70 dB(A). I risultati di questo studio hanno suggerito un limite di comfort acustico inferiore a 55 dB(A), un limite di sicurezza acustico a 55-65 dB(A), un limite di cautela acustica a 65-75 dB(A) nonché un limite di esposizione occupazionale non superiore a 80 dB(A), ovvero lo stesso indicato dalla legge italiana in materia di esposizione al rumore nei luoghi di lavoro [18].

Tra gli effetti maggiormente associati all'inquinamento acustico si riscontrano principalmente disturbi che interessano la sfera psico-sociologica. Infatti, il rumore di fondo pur avendo un livello troppo basso per essere in grado di causare effetti uditivi, può avere comunque un impatto significativo sulla salute umana. Tra gli effetti psicosociali causati dal rumore ambientale si riscontrano: annoyance, stress, disturbi del sonno, deficit dell'attenzione, danneggiamento della memoria a lungo termine, insorgenza di sentimenti negativi (quali paura, rabbia, frustrazione, dispiacere, abbandono). Questi effetti anche se possono sembrare temporanei, possono avere un impatto sulla salute umana a lungo termine, determinando alterazioni biochimiche, fisiologiche e cognitive.

Quando il rumore induce una serie di effetti negativi, interferendo con le attività quotidiane, i sentimenti, i pensieri, o il sonno, si parla di *disturbo* o *annoyance*. Per annoyance si intende “un sentimento di scontentezza riferito al rumore che l'individuo sa o crede che possa agire su di lui in modo negativo” ovvero una “risposta soggettiva agli effetti combinati dello stimolo disturbante e di altri fattori extraesposizionali di natura psicologica, sociologica ed economica”.

L'annoyance è la conseguenza più immediata relativa all'inquinamento acustico. Se l'esposizione è prolungata nel tempo si possono osservare alterazioni dei comportamenti individuali come l'innalzamento del livello di ascolto di contenuti audio, ma anche mutamenti caratteriali, isolamento sociale, riduzione del rendimento

lavorativo, della rapidità e della qualità dell'apprendimento, della qualità del sonno, aumento della disattenzione e degli incidenti.

Il disturbo dipende dalle caratteristiche del rumore, dalla tipologia della sorgente sonora, dall'ambiente circostante ma anche da molteplici fattori non acustici. Le caratteristiche del rumore riguardano principalmente il livello di pressione sonora, lo spettro e la durata, la fluttuazione nel tempo del livello di pressione sonora e dello spettro, la presenza di eventi impulsivi e la localizzazione della sorgente sonora, il rumore di fondo dell'ambiente.

Infine, un altro aspetto da considerare è sicuramente la suscettibilità individuale in funzione del livello di esposizione; infatti, alcune persone presentano una maggiore sensibilità, si tratta di categorie particolarmente vulnerabili come soggetti che soffrono di depressione, ipocondria, ansia, attacchi di panico o di altre condizioni concomitanti.

CAPITOLO IV

Riferimenti normativi

4.1 Normativa relativa al rumore nei luoghi di lavoro

Il rumore rappresenta un serio rischio, in termini di diffusione e gravità, in molteplici settori lavorativi. Il numero delle denunce delle malattie professionali aventi come agente causale il rumore e l'aumento delle conoscenze acquisite riguardo le sue implicazioni sulla salute mentale e fisica, hanno reso necessaria la produzione di leggi, regolamenti, norme e linee guida che regolamentassero la materia.

In Italia il Decreto Legislativo n. 81 del 2008 e s.m.i. ovvero il “Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro” ha incorporato il precedente DLgs. 195/2006, che costituisce il recepimento della Direttiva 2003/10/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa *all'esposizione dei lavoratori dai rischi derivanti dagli agenti fisici (rumore)*.

In particolare, il *Testo Unico* riserva alla disamina degli agenti fisici, il Titolo VIII (Capi I e II), ove stabilisce:

- le modalità della valutazione dei rischi, artt. 181, 188- 191;
- gli interventi di prevenzione e protezione da attuare, artt. 182, 192, 194;
- i criteri di utilizzo dei dispositivi di protezione individuali, art. 193;
- la formazione e l'informazione dei lavoratori, artt. 36, 37, 184, 195;
- la sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti, artt. 185, 196.

Nell'ambito della valutazione dei rischi, all'art. 188, fornisce come indicatori di rischio:

- a) *pressione acustica di picco* (p_{peak}); cioè il “valore massimo della pressione acustica istantanea ponderata in frequenza C”;
- b) *livello di esposizione giornaliera al rumore* (LEX_{8h}): [dB(A) riferito a 20 μ Pa]: ossia il “valore medio, ponderato in funzione del tempo, dei livelli di esposizione al rumore per una giornata lavorativa nominale di otto ore, definito dalla Norma

Internazionale ISO 1999:1990 punto 3.6". Si riferisce a tutti i rumori sul lavoro, incluso il rumore impulsivo;

- c) *livello di esposizione settimanale al rumore* ($L_{EX,w}$): ossia il "valore medio, ponderato in funzione del tempo, dei livelli di esposizione giornaliera al rumore per una settimana nominale di cinque giornate lavorative di otto ore, definito dalla Norma Internazionale ISO 1999:1990 punto 3.6, nota 2".

Definisce, all'art. 189 i *valori limite di esposizione* e *valori di azione*, in relazione al livello di esposizione giornaliera al rumore e alla pressione acustica di picco; ovvero:

- a) *valori limite di esposizione*: $L_{EX} = 87 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 140 \text{ dB(C)}$ riferito a $20 \mu\text{Pa}$;
- b) *valori superiori di azione*: $L_{EX} = 85 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 137 \text{ dB(C)}$ riferito a $20 \mu\text{Pa}$;
- c) *valori inferiori di azione*: $L_{EX} = 80 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 135 \text{ dB(C)}$ riferito a $20 \mu\text{Pa}$.

Dunque, secondo quanto previsto dall'art. 190, se a seguito della valutazione dei rischi, si possa ritenere che i *valori inferiori di azione* (art. 189) siano superati, il datore di lavoro - a cui è in capo l'onere della valutazione - misura i livelli di rumore a cui sono esposti i lavoratori. Le misurazioni devono essere effettuate utilizzando metodi e strumenti adeguati alle caratteristiche del rumore da misurare, alla durata dell'esposizione e ai fattori ambientali, secondo quanto previsto dalle norme tecniche. Una volta effettuate le misure, il datore di lavoro, tiene conto delle incertezze.

Qualora i *valori superiori di azione*, risultino superati, ai sensi dell'art. 192, il datore di lavoro deve attuare misure tecniche e organizzative volte a ridurre i rischi per la salute dei lavoratori.

Nei casi in cui, i rischi non possano essere evitati anche a seguito dell'adozione delle misure di prevenzione e protezione, ai sensi dell'art. 193, si interviene con dispositivi di protezione individuali dell'udito (DPI-u). In particolare, il datore di lavoro:

- "mette a disposizione" dei lavoratori i DPI-u, se il livello di esposizione supera i *valori inferiori di azione* [$L_{EX} = 80 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 135 \text{ dB(C)}$], sarà dunque discrezione del lavoratore decidere di utilizzarli;
- "esige" che i lavoratori indossino i DPI-u se il livello di esposizione è pari o al di sopra dei *valori superiori di azione* [$L_{EX} = 85 \text{ dB(A)}$ e $p_{\text{peak}} = 137 \text{ dB(C)}$].

La scelta dei DPI-u deve avvenire in relazione alla loro efficienza, valutata in termini di attenuazione prodotta e sempre nel rispetto del valore limite di esposizione. Per

garantire la completa sicurezza dei lavoratori, è fondamentale valutare attentamente l'attenuazione prodotta dal DPI-u al fine di evitare il problema opposto, ovvero l'*iperprotezione*, che isolerebbe il lavoratore dall'ambiente esterno, esponendolo in tal modo a un diverso tipo di rischio. Inoltre, il DPI-u scelto deve essere adeguato alla mansione e non deve rallentare o compromettere lo svolgimento delle normali attività del lavoratore.

I lavoratori esposti a livelli uguali o superiori ai valori inferiori di azione, ai sensi degli artt. 36, 37, e 184; devono essere informati e formati, dal datore di lavoro in merito ai rischi provenienti dall'esposizione al rumore e alle misure di prevenzione e protezione da attuare.

Per i lavoratori la cui esposizione al rumore eccede i valori superiori di azione è obbligatorio predisporre la sorveglianza sanitaria, ai sensi degli artt. 185 e 186, da effettuarsi di norma una volta l'anno, o con periodicità diversa decisa dal medico competente; mentre è estesa ai lavoratori esposti a livelli superiori ai valori inferiori di azione, su loro richiesta e qualora il medico competente ne confermi l'opportunità [19].

In riferimento al rumore nei luoghi di lavoro si citano anche:

- Le linee guida dell'ISPESL (2005), e le norme UNI 9432 (2008) ed EN ISO 9612 (2009) per la valutazione del rischio;
- Le norme EN ISO 11690-1,2 (1996) ed EN ISO 11690-3 (1998) per la progettazione acustica degli ambienti di lavoro al fine di ridurre il rischio;
- Le norme ISO 4869-1 (1990) e 4869-2 (1994) per i dispositivi di protezione individuali dell'udito.

4.2 Normativa relativa all'esposizione al rumore negli edifici

I livelli di esposizione sonora in un ufficio non eguaglierebbero mai i livelli di esposizione che si raggiungono in altre attività lavorative, dunque i criteri valutativi prescritti dal D.Lgs. 81/2008 al Titolo VIII non sono adeguati, ma si assume comunque che in qualsiasi area cui hanno accesso i lavoratori il L_{Aeq} non deve mai superare gli 80 dB(A).

Il D.Lgs. 81/2008 all'allegato XXXIV, per le postazioni di lavoro al videoterminale specifica che "il rumore emesso dalle attrezzature presenti nel posto di lavoro non deve perturbare l'attenzione e la comunicazione verbale"

Le sorgenti sonore negli uffici possono essere molteplici:

- Il rumore emesso dai sistemi di ventilazione e aria condizionata, da stampanti e fotocopiatrici, dai server, è un rumore di tipo *continuo*
- Il rumore di un telefono che squilla, di un campanello o di un allarme è un rumore di tipo intermittente o *discontinuo*
- Il rumore di fondo di una conversazione, di digitazione sulla tastiera, di passi o di sedie che si spostano è un tipo di rumore *fluttuante*
- Il rumore di un oggetto che cade è un tipo di rumore *impulsivo*

La combinazione di suoni differenti può comportare variazioni significative nel contributo spettrale del rumore.

Come già sottolineato, è stato dimostrato che il rumore ambientale di fondo, sebbene non rappresenti un rischio per l'insorgenza di patologie dell'apparato uditivo, influenzi il benessere degli occupanti determinando effetti extra-uditivi, pertanto, deve essere valutato il rischio in relazione a tali effetti.

I criteri per la valutazione sono da ricercare nella normativa tecnica.

La norma UNI EN ISO 11690-1 (2021) fornisce indicazioni sui livelli di rumore accettabile. In particolare, il livello equivalente ambientale (L_{Aeq}) dovrebbe essere inferiore a:

- 45dB (A), per compiti che richiedono concentrazione;
- 55 dB(A), in uffici singoli e per attività di routine;
- 65 dB(A), negli uffici open-space.

Inoltre, il livello del rumore di fondo dovrebbe essere inferiore a 40 dB(A) per uffici singoli e 45 dB(A) per open-space.

La norma UNI 8199 (2016) propone i valori dei livelli sonori (L_{Aeq}) da ritenere accettabili per il comfort acustico all'interno di ambienti con diverse destinazioni d'uso, in particolare per il collaudo acustico degli impianti di climatizzazione e

ventilazione (UNI 8199b) definisce il L_{ic} ovvero il “livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo”. Relativamente agli uffici, la norma definisce i seguenti livelli di riferimento in dB(A):

- 35 dB(A) per uffici singoli ad attività progettuale;
- 40 dB(A) per uffici singoli ad attività di routine;
- 45 dB(A) per uffici open-space ed aree aperte al pubblico

Valori dei livelli di riferimento maggiori di 5 dB(A) rispetto a quelli sopra elencati sono sconsigliati in quanto non offrono garanzie sufficienti ai fini del conseguimento delle condizioni di benessere.

Infine, sempre secondo la norma UNI 8199 (2016), il tempo di riverberazione, che influisce sulla chiarezza del suono, dovrebbe essere compreso tra 0,5 e 1 secondo per frequenze tra 250 Hz e 4 kHz, assimilabili a quelle del linguaggio parlato.

Per una completa caratterizzazione acustica è consigliata inoltre la rilevazione di altri parametri, come ad esempio il SIL (Speech Interference Level) e l'indice RC suggerito dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) nell'ambito della valutazione di impatto acustico [20].

CAPITOLO V

Il comfort acustico negli uffici

5.1 Comfort acustico: definizione

Quando, immersi in un campo sonoro, ci si trova in una condizione di benessere psicofisico, possiamo definire tale stato come *comfort acustico*.

Il discomfort acustico, in ambiente interno è associato spesso ad altri fattori come qualità dell'aria, illuminazione, benessere termico, ergonomia. In relazione ad ambienti lavorativi come gli uffici, questi parametri sono spesso considerati nel complesso, quindi non è facile trovare dati univoci su uno specifico fattore.

Riguardo al complesso di descrittori della qualità dell'ambiente indoor si usa la denominazione “sindrome dell'edificio malato” per descrivere gli effetti negativi provocati dall'ambiente sugli individui che lo occupano. In particolare, è stata evidenziata una relazione tra sintomi fisici, sintomi psicoemotivi e l'ergonomia ambientale [21]. Sebbene non siano ancora ben chiare tali relazioni e i sintomi si ascrivano ad una sintomatologia lieve, dal momento che ciò comporterebbe una riduzione della produttività e un aumento di assenteismo, le aziende stanno rivolgendo maggior attenzione al benessere dei lavoratori nella costruzione degli edifici adibiti a luoghi di lavoro. In quest'ottica possono essere previsti:

- Interventi sulla forma degli edifici, per ridurre il rumore;
- Interventi sulla distribuzione spaziale interna degli ambienti, per confinare il rumore;
- Interventi sulla facciata e sulle finestre, per schermare il rumore.

5.2 Primi studi relativi al comfort acustico negli uffici

Gli aspetti fondamentali da considerare per creare un ambiente di lavoro confortevole includono l'illuminazione, il comfort termico ed acustico. In particolare, il controllo del rumore costituisce una problematica molto rilevante negli ambienti interni,

soprattutto negli uffici, dove la necessità di un ambiente silenzioso è cruciale per favorire la concentrazione ed una comunicazione efficace.

Leo Beranek è stato tra i primi a condurre ricerche significative nell'ambito della rumorosità negli uffici, questi, in particolare, nel 1956 condusse uno studio sui “criteri per un ufficio silenzioso” [22] che ha rappresentato un evento significativo in questo campo.

Tuttavia, ancora oggi nonostante la creazione di vari indicatori per monitorare aspetti specifici del rumore, non è stato trovato un indicatore globale che misuri il livello di comfort acustico negli uffici.

Lo studio di Beranek era basato su un questionario composto da 15 scale di valutazione, il quale era stato somministrato a 190 dipendenti della U.S. Air Force. L'obiettivo era identificare i livelli massimi di rumore tollerabili dal personale che lavorava negli uffici e le loro possibili reazioni. A seguito dello studio emerse che, la difficoltà di conversazione risultava essere la principale conseguenza del rumore.

Per tale motivo, è stato introdotto il “SIL” - Speech Interference Level, ovvero il “livello di interferenza del parlato” come indicatore per valutare l'efficienza acustica negli uffici. Per gli ambienti di lavoro in cui la comunicazione verbale risulta fondamentale, è stato stabilito un livello massimo di rumorosità accettabile, il quale non deve essere superiore di 40 dB rispetto al valore del SIL [23].

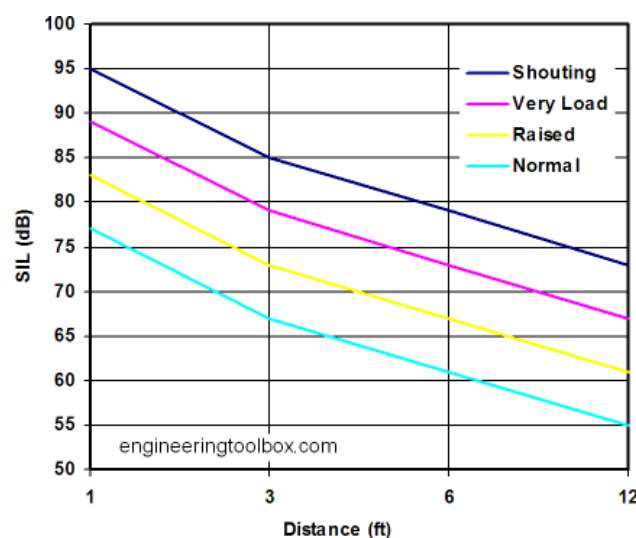


Figura 9 SIL - (Speech Interference Level)

Dai risultati del questionario, Beranek era stato in grado di rilevare che i lavoratori operavano a livelli sonori più elevati di circa 22 unità rispetto al valore limite SIL, gli effetti di maggior disturbo si riscontravano a livelli di rumore a partire dai 70 dB.

5.2.1 Valutazione della percezione del rumore in ufficio

L'innovazione principale apportata da Beranek nell'ambito della determinazione dei "criteri per un ufficio silenzioso" fu l'introduzione di un questionario per valutare l'intensità soggettiva di percezione del rumore negli uffici.

Il questionario è uno strumento fondamentale per comprendere come la rumorosità influisca sul benessere dei lavoratori; infatti, a differenza degli effetti sulla salute, che sono manifestazioni cliniche inconfutabili, il concetto di *comfort* è intrinsecamente legato alla dimensione soggettiva dell'individuo, ed è associato ad una *sensazione* personale. Dunque, per affrontare la problematica del rumore negli uffici è fondamentale raccogliere dati direttamente dai lavoratori che li occupano, estrapolare dati individuali e soggettivi, di conseguenza trarne conclusioni il più possibile complessive, e dunque oggettive.

Il questionario proposto da Beranek è stato successivamente citato in numerosi studi sulla rumorosità negli ambienti di lavoro e non solo, e ne sono state proposte anche diverse rielaborazioni.

5.3 Indici e descrittori della rumorosità indoor

Allo scopo di caratterizzare in modo oggettivo la rumorosità negli ambienti indoor, sono stati introdotti i primi indici di disturbo, ovvero parametri oggettivi intesi a quantificare la sensazione di disturbo, definiti in base alla valutazione della riduzione dell'intelligibilità del parlato. Di seguito si descrivono i principali indici di disturbo sonoro attualmente conosciuti. [24].

5.3.1 Livello sonoro continuo equivalente (L_{Aeq})

Il L_{Aeq} , ovvero il livello sonoro continuo equivalente, è definito come il valore del livello di pressione sonora ponderato in dB(A) di un ipotetico suono costante che, misurato nello stesso intervallo di tempo (T), possiede uguale contenuto energetico (e

dunque lo stesso potenziale nocivo) di un corrispondente suono variabile analizzato nel medesimo intervallo di tempo, in secondi.

Di seguito se ne riporta la formula:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_0^T \frac{p_a^2(t)}{p_0^2} dt \right] dB (A)$$

5.3.2 Speech Interference Levels: SIL e PSIL

Il SIL ovvero, Speech Interference Level, è definito come la media dei livelli di pressione sonora nelle bande di ottava comprese rispettivamente tra 600 e 1200 Hz, 1200 e 2400 Hz, e tra 2400 e 4800 Hz. Questo parametro si riferisce alla valutazione dell'intellegibilità della comunicazione diretta, nelle condizioni in cui la riverberazione non costituisce un fattore di influenza. Successivamente, il SIL è stato ridefinito come PSIL ovvero, Preferred Speech Interference Level, quest'ultimo si caratterizza per bande di ottava differenti. Infatti, è stato evidenziato che un discorso copre frequenze comprese tra 200 e 6000 Hz, dunque per semplicità per il calcolo dei livelli di interferenza del parlato, si utilizzano esclusivamente i livelli di pressione sonora in tre o massimo quattro bande di ottava.

$$PSIL = \frac{(L_{p500} + L_{p1000} + L_{p2000})}{3} \text{ dB}$$

5.3.3 Curve NC “Noise Criteria” ed NCB “Balaced Noise Criteria”:

Beranek, nel 1957, basandosi su una serie di interviste condotte sia in ambienti di vita e di lavoro, che in spazi aperti, tenendo conto dell'interferenza di una serie di sorgenti sonore con il parlato, propose una famiglia di curve denominate Noise Criteria (NC).

Tali curve, definiscono livelli di percezione sonora approssimativamente uguali a quelli dell'orecchio umano e rappresentano una serie di spettri di bande di ottava, cui è associato ognuno un certo grado di interferenza misurato dal SIL, corrispondente alla curva più alta toccata.

Nel 1989, lo stesso Beranek ha aggiornato e migliorato le curve Noise Criteria introducendo le Balanced Noise Criteria (NCB), che sono essenzialmente una nuova versione delle curve precedenti, modificate sulle alte frequenze ed estese alle basse frequenze.

5.3.4 Curve RC “Room Criteria”:

Blazier, nel 1981, propose le curve Room Criteria (RC), queste sono indicate specificamente per valutare il rumore di fondo prodotto dagli impianti di climatizzazione in ambienti “non occupati”, anch’esse sono basate sul grado di interferenza con il parlato e confrontano lo spettro del rumore preso in esame con uno spettro di riferimento. Tali curve rappresentano attualmente il metodo più utile per determinare il livello sonoro del rumore dei sistemi HVAC. Le curve RC superano in parte i limiti di quelle NC, in quanto forniscono un’indicazione aggiuntiva sulla qualità del rumore, consentendo di individuare i suoni percepiti come “rombanti” o “sibilanti”, poiché utilizzano bande di ottava comprese tra 16,5 e 31Hz, che consentono di tenere conto anche del rumore generato dalle vibrazioni nelle parti più leggere delle strutture.

5.3.5 RC MARK II ed indice QAI “Quality Assesment Index”

Blazier, successivamente nel 1997 propose nuove curve, denominate RC MARK II, ed introdusse notevoli cambiamenti riguardo la procedura per determinare la qualità dello spettro acustico. Inoltre, introdusse un indice numerico per la valutazione della qualità, Quality Assesment Index (QAI), che si basa sulle differenze tra i valori dello spettro e la curva neutra RC ad esso corrispondente.

In seguito, è stato proposto un altro indice, che combina linearmente la misura dell’intensità del rumore, attraverso le curve RC, con la misura della qualità del suono definita dal QAI. Si ottiene dunque il Combined Noise Index (CNI) che rappresenta meglio la sensazione soggettiva di disturbo provocato dal rumore [25].

CAPITOLO VI

La rumorosità degli impianti di condizionamento

6.1 Funzionamento degli impianti

Le fonti di rumore in ufficio possono essere antropogeniche o derivate da apparecchiature, attrezzature e impianti presenti nell'ambiente. Queste ultime possono produrre un rumore di tipo discontinuo, come ad esempio telefoni, stampanti e fotocopiatrici, personal computer, fax; o di tipo continuo, è il caso dei *sistemi di riscaldamento, ventilazione e aria condizionata (HVAC)*, che presentano significative variazioni della componente spettrale, ma solo tra le diverse condizioni di funzionamento. Negli uffici si utilizzano spesso le unità denominate fan coil, per la loro facilità di installazione e la loro versatilità; infatti, hanno sia una funzione di riscaldamento che di raffreddamento, molti fan coil sono anche dotati di sistemi di controllo che monitorano e regolano in automatico la temperatura in relazione alle esigenze dell'ambiente.

In un fan coil o ventilconvettore, un ventilatore recupera l'aria dall'ambiente per riscaldarla o raffreddarla, attraverso un'apertura situata nella parte superiore del terminale. Una volta immessa nell'impianto, l'aria viene filtrata e spinta verso una batteria di scambio termico dove, per convezione forzata, questa scambia calore con il fluido (aria). Per la funzione di riscaldamento il calore viene estratto, per quella di raffreddamento viene trasferito [26].

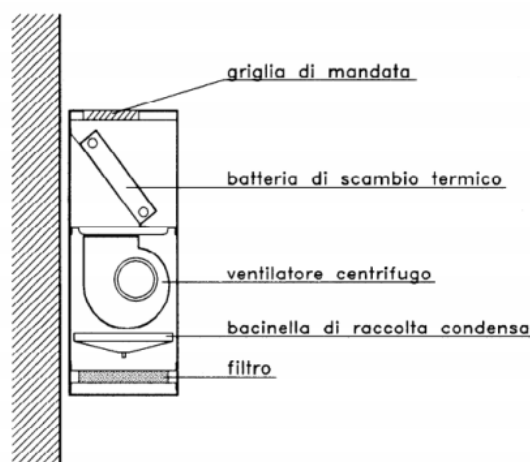


Figura 10 Schema di funzionamento di un fan coil

I fan coil costituiscono il terminale di un impianto che, a seconda del fluido termovettore che utilizzano, possono essere idronici (ad acqua), aeraulici (ad aria), misti (aria/acqua).

-Impianti idronici: sono collegati ad un circuito idraulico che utilizza acqua come fluido termovettore, questa passa attraverso una serpentina, mentre un ventilatore aspira aria dall'ambiente attraverso delle griglie di aspirazione, dopodiché l'aria a contatto con la serpentina scambia calore con l'acqua. Se la temperatura dell'acqua è calda, l'aria si riscalda, viceversa se è fredda si raffredda. Infine, l'aria trattata viene reintrodotta nell'ambiente attraverso delle griglie di mandata.

-Impianti aeraulici: utilizzano l'aria come fluido termovettore, essi aspirano l'aria dall'ambiente attraverso un ventilatore, all'interno dell'impianto è sempre presente una serpentina, attraverso la quale passa l'aria aspirata, che viene riscaldata o raffreddata attraverso il contatto con essa e reintrodotta nell'ambiente attraverso un ventilatore.

-Impianti misti aria/acqua: combinano le caratteristiche degli impianti idronici e aeraulici, sono molto diffusi in quanto permettono una maggiore efficienza energetica. In tali impianti, l'aria viene aspirata e filtrata, dopodiché passa attraverso una serpentina che permette lo scambio di calore con l'acqua. L'utilizzo dell'acqua per il riscaldamento e il raffreddamento, riduce i consumi energetici rispetto ad un sistema completamente aeraulico.

6.2 Rumorosità dei fan coil e strategie per la riduzione del rumore

Nei fan coils la componente che genera maggior rumore è il ventilatore. Per movimentare la "portata d'aria" è dotato di pale, che interagiscono con il flusso d'aria generando dipoli acustici e turbolenze che producono rumore. Ulteriore rumore è generato dal motore elettrico e dal sistema di trasmissione che trasmette la rotazione alla girante del ventilatore. Ulteriore fonte di rumore è dovuta all'interazione del flusso d'aria con le batterie di scambio termico [27].

Le strategie da attuare per mitigare il rumore prodotto dagli impianti sono essenzialmente di due tipi:

- Interventi sulle sorgenti di rumore: attraverso l'impiego di silenziatori e limitando la trasmissione delle vibrazioni meccaniche
- Interventi sulla propagazione del suono: mediante limitatori fonoisolanti o fonoassorbenti, come silenziatori, strati antivibranti.

Per una corretta mitigazione del rumore degli impianti di climatizzazione, va prima di tutto individuata la sorgente di rumore, poi compreso il suo meccanismo di generazione e infine si può agire su di essa.

Le sorgenti mobili, quali ad esempio le pale del ventilatore generano urti periodici dell'aria circostante, se il contatto avviene con aria in quiete si osserva un fenomeno di trasmissione semplice mentre, se il contatto avviene con aria in moto si osserva un fenomeno di trasmissione attraverso turbolenza.

Il rumore provocato dall'urto delle pale del ventilatore contro l'aria può essere attenuato:

- modificando la forma delle pale
- riducendo la frequenza del rumore
- utilizzando un silenziatore

Inoltre, qualora risulti necessario, per intervenire sulla propagazione del rumore all'interno e all'esterno dell'impianto si possono utilizzare silenziatori per fare in modo che il fenomeno non solo non si incrementi a causa della risonanza con le altre strutture presenti sia al loro interno che al loro esterno, ma si smorzi, cedendo l'energia sonora ad elementi meccanici fortemente dissipativi.

Le indagini effettuate fino ad oggi si concentra maggiormente sugli uffici open space; tuttavia, in precedenti ricerche [28] è stato riscontrato che il rumore dei fan coils negli uffici singoli raggiunge livelli in media maggiori di quelli degli uffici open space.

Sperimentazione

Le misurazioni sono state acquisite durante le normali ore di lavoro degli impiegati, in ambienti ad uso ufficio. All'interno delle stanze considerate era presente n. 1 fan coil, erano inoltre presenti diverse attrezzature di lavoro quali computer, stampanti, telefoni e fax.

Le misurazioni sono state svolte in stanze non occupate, con porte e finestre chiuse. Sono state eseguite registrazioni per tutte le modalità di funzionamento dei fan coil, ovvero: velocità minima, media e massima. In seguito, per la realizzazione del test sperimentale, sono state utilizzate esclusivamente la velocità minima e massima.

Una volta acquisite le registrazioni, queste sono state tagliate estrapolando esclusivamente n. 30 secondi (s) consecutivi, ed analizzate mediante l'utilizzo del software ArtemiS Suite (HEAD Acoustics).

Per rilevare le principali differenze tra le caratteristiche del rumore generato dai fancoils, le diverse registrazioni sono state analizzate in termini di parametri acustici e psicoacustici. I parametri acustici che sono stati considerati sono il livello sonoro equivalente (L_{eq} , L_{Aeq} e il 5° e 95° percentile (L_{A5} , L_{A95})). Per quanto riguarda i parametri psicoacustici sono stati considerati Loudness (N), Sharpness (S), Roughness (R), Fluctuation Strength (F) e Tonality (T), i percentili sono stati estratti secondo la Tabella D1 di ISO12913-2 Annex D [33]. I parametri psicoacustici sono stati calcolati utilizzando il software ArtemiS Suite (HEAD Acoustics), come descritto di seguito.

La Loudness è stata calcolata secondo il metodo ANSI S3.4-2007 (FFT). La Sharpness è stata calcolata secondo Aures Ansi S3.4 2007 (FFT). La Roughness è stata calcolata secondo ECMA-418-2 (1st Edition), la Tonality in accordo con ECMA-74(17th)/ECMA-418-2 (1st), infine la Fluctuation Strength è stata calcolata in 1/1 bark. Per ogni parametro psicoacustico è stata inoltre estratto valore medio, 5th e 95th percentile.

7.2.2 Calibrazione

Prima di procedere con la sessione sperimentale, sono state eseguite una serie di prove preliminari per la verifica delle condizioni sperimentali. Inoltre, è stata effettuata una calibrazione per regolare il volume effettivo dell'audio in cuffia ad un livello per cui l'ascolto risultasse in linea con le misure eseguite in campo ed al fine di replicare i medesimi livelli di rumore delle diverse tracce audio dei fancoils, all'udito dell'ascoltatore.

A tale scopo, e per la successiva sperimentazione, è stata utilizzata la test room del laboratorio SENS-i-Lab del Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", sito in Aversa (CE).

Per la calibrazione è stato utilizzato un manichino HSU III.2 (HEAD acoustics), il dispositivo SQobold (HEAD acoustics), delle cuffie (Sennheiser HD 200 PRO), un altro paio di cuffie binaurali (HEAD acoustics) ed infine il medesimo pc utilizzato per gli esperimenti.



Figura 11 Strumenti per la calibrazione

Primariamente è stato collegato il dispositivo SQobold al manichino, sul quale sono state posizionate anche le cuffie per l'ascolto. Questo per misurare il livello sonoro effettivo uscente dalle cuffie.

Si è proceduto, dunque a far partire le tracce audio e a verificare, per tutte le condizioni, cosa venisse percepito attraverso le cuffie, mentre attraverso il dispositivo SQobold è

stato verificato che i livelli in dB(A) all'orecchio del manichino corrispondessero ai livelli effettivi misurati in campo. Al dispositivo SQobold sono state collegate anche delle cuffie binaurali, queste sono state necessarie per ascoltare se lo strumento stesse registrando il suono e per associare a quale audio fosse riferito il livello mostrato dallo strumento.

In tutto la verifica è stata effettuata per cinque condizioni, ovvero per:

- l'audio contenente esclusivamente il rumore del fan coil, precedentemente registrato
- l'audio contenente il suono dell'acqua a -3 dB
- l'audio contenente il suono dell'acqua a -6 dB
- l'audio contenente sia il rumore del fan coil sia il suono d'acqua a -3 dB
- l'audio contenente sia il rumore del fan coil sia il suono d'acqua a -6 dB

Nome audio	Level vs. Time L(A) in dB (SPL)
FC1	43,0
FC2	45,1
FC3	51,6
FC4	52,4
FC5	56,0
FC6	57,5
W1-3	40,1
W2-3	42,2
W3-3	48,7
W4-3	49,5
W5-3	53,1
W6-3	54,6
W1-6	37,1
W2-6	39,2
W3-6	45,7
W4-6	46,5
W5-6	50,1
W6-6	51,6

Tabella 1 Audio esperimento (in giallo quelli utilizzati per la calibrazione)

A seguito della calibrazione il volume della scheda audio del pc è stato impostato a 80.

7.2.3 Noise Sensitivity Questionnaire (NoiSeQ)

Prima di effettuare la sperimentazione, al fine di valutare la sensibilità al rumore dei soggetti coinvolti nello studio è stata utilizzata una rielaborazione del questionario Noise Sensitivity Questionnaire (NoiSeQ) [34], somministrato attraverso un file eseguibile, (.exe).

Il questionario utilizzato è basato su una scala likert a quattro punti, che va da “*completamente d'accordo*” a “*completamente in disaccordo*”. Il questionario è composto da una serie di 36 domande/affermazioni, volte a raccogliere informazioni indicative per effettuare una stima del livello di sensibilità degli esecutori, basandosi su differenti aspetti della vita quotidiana (tempo libero, lavoro, attività domestiche, comunicazione e sonno). Al termine del questionario, è assegnata una percentuale specifica di sensibilità al rumore in relazione ai diversi ambiti. Il questionario tiene conto anche dei fattori individuali in grado di influenzare la sensibilità uditiva, qualità, genere e problemi di udito pregressi.

Di seguito si riportano le domande contenute nel questionario somministrato.

	Complet. d'accordo	Abbastanza d'accordo	Abbastanza in disaccordo	Complet. in disaccordo
1. Trovo difficile rilassarmi in un ambiente rumoroso				
2. Ho bisogno di tranquillità per svolgere un lavoro impegnativo				
3. Pur di abitare in una zona silenziosa accetto altri svantaggi				
4. Sono molto sensibile ai rumori del circondario				
5. Trovo difficile comunicare in ambienti rumorosi				
6. Non ho alcun problema a svolgere un lavoro routinario in un ambiente rumoroso				
7. Divento molto nervoso se sento qualcuno parlare mentre cerco di addormentarmi				
8. Quando sono impegnato in una conversazione non mi rendo conto dei rumori circostanti				
9. Riesco ad addormentarmi persino quando c'è rumore				

10. Le mie performance sono molto peggiori quando sono in un ambiente rumoroso				
11. Ascoltare musica ad alto volume mi aiuta a rilassarmi dopo il lavoro				
12. Al ristorante non riesco a concentrarmi bene nelle conversazioni quando al tavolo vicino qualcuno parla a voce alta				
13. Ho bisogno di un ambiente tranquillo per riuscire a lavorare a nuovi compiti				
14. Quando la gente intorno a me è rumorosa non vado avanti col mio lavoro				
15. Ho bisogno di un ambiente assolutamente tranquillo per riuscire a dormire serenamente				
16. Già col minimo rumore mi addormento con difficoltà				
17. Sono sensibile al rumore				
18. Quando sono a casa mi abituo rapidamente al rumore				
19. Al cinema sono infastidito dalle persone che bisbigliano o dal fruscio della carta				
20. Penso che la musica interferisca con la conversazione				
21. Trovo molto difficile seguire una conversazione quando la radio è accesa				
22. Quando il mio luogo di lavoro è rumoroso cerco sempre un modo per rimediare				
23. Quando vado a ballare non mi importa quanto è alto il volume della musica				
24. Non mi infastidirebbe abitare in una strada rumorosa				
25. Quando i figli degli altri sono chiasosi preferirei che non giocassero davanti casa mia				
26. Preferisco passare i fine settimana in un ambiente tranquillo				
27. Non mi sento ben riposato se durante la notte c'è stato molto rumore				
28. Quando sono a casa trovo fastidioso che la radio o la TV rimangano accese come sottofondo				
29. Quando in un locale c'è musica a volume alto non riesco a conversare				

30. Posso svolgere bene lavori complicati con musica di sottofondo				
31. Mi sveglio al minimo rumore				
32. Evito attività di svago rumorose				
33. Non mi piace che si svolgano attività rumorose nella zona dove abito				
34. I rumori prodotti dal vicinato possono essere estremamente fastidiosi (ad es. rumore di passi)				
35. Il suono dei tuoni normalmente non mi sveglia				
36. Fatico a concentrarmi su una conversazione quando c'è troppo rumore				
ISTRUZIONI: per ogni affermazione, segni la casella che meglio descrive la sua personale opinione.				

Il questionario è stato somministrato in totale ad un campione di 21 soggetti. Dai dati acquisiti attraverso la somministrazione del questionario Noise Sensitivity Questionnaire (NoiSeQ) è emerso che il livello di sensibilità al rumore del campione di soggetti fosse variabile

7.2.4 Test della risposta soggettiva al rumore dei fan coil

Per la sessione sperimentale è stato effettuato un test della risposta soggettiva al rumore dei fancoils. Per la realizzazione, e per la successiva somministrazione del test è stato utilizzato il software PsychoPy.

Il test è basato su una scala likert a nove punti, ovvero da uno (*per niente*) a nove (*estremamente*), ed è stato strutturato, relativamente alle seguenti dimensioni:

- annoyance: ovvero il fastidio percepito
- valenza: ad es. piacevole/spiacevole; gradevole/sgradevole
- arousal: ad es. stimolante/ noioso

Inoltre, al fine di valutare le emozioni e le sensazioni evocate dallo stimolo uditivo sono stati inclusi aggettivi come: calmo/nervoso; debole/energico; felice/triste.

Inizialmente ai soggetti è stato chiesto di immedesimarsi in un contesto lavorativo come quello di un ufficio e di immaginare di dover eseguire un compito complesso per cui fosse richiesta concentrazione. Dunque, è stato chiesto di rispondere in merito al

grado di fastidio che il rumore ascoltato provocasse loro ed a quanto ritenessero che il suddetto rumore incidesse sulla loro produttività durante un'ipotetica attività lavorativa.

Successivamente, è stato chiesto ai soggetti di valutare il rumore ascoltato, in base a sei items proposti, su due livelli; rispettivamente positivo (gradevole, stimolante, piacevole) e negativo (sgradevole, noioso, spiacevole). Infine, sono stati proposti sei items, tre positivi (calmo, energico, felice) e tre negativi (nervoso, debole, triste), per permettere ai soggetti di valutare in che modo il suono che stessero ascoltando li facesse sentire sotto l'aspetto emozionale. Questa parte del test è stata strutturata sulla base di un questionario proposto in un precedente studio per la valutazione della salienza emotiva dei suoni [35].

Di seguito si riportano le domande che sono state proposte per l'esecuzione del test.

Immagini di lavorare in un ufficio e di DOVER SVOLGERE UN COMPITO IMPORTANTE E COMPLESSO...									
Quanto definirebbe fastidioso questo suono?	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quanto influirebbe questo suono sulla sua concentrazione e produttività durante l'attività lavorativa?	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quanto il suono che sta ascoltando è:									
PIACEVOLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
STIMOLANTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
GRADEVOLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quanto il suono che sta ascoltando è:									
SPIACEVOLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NOISO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SGRADEVOLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quanto il suono che sta ascoltando la fa sentire :									
CALMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ENERGICO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
FELICE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Quanto il suono che sta ascoltando la fa sentire :									
NERVOSO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
DEBOLE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TRISTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 = <i>per niente</i> 9 = <i>estremamente</i>									

Da studi sperimentali è emerso che il suono dell'acqua (ad es. ruscelli, fontane) sarebbe il più efficace per ridurre l'intensità ed attenuare il fastidio provocato da suoni sgradevoli [36].

Di conseguenza, i suoni d'acqua sono stati utilizzati come suoni per il mascheramento informativo-attenzionale per diversi tipi di rumore, e sono stati osservati effetti positivi sulla percezione sonora degli individui. In particolare, sono stati condotti esperimenti di questo tipo per il rumore degli aerei [37], del traffico [38-39], per i rumori di tipo industriale [40].

Nel test elaborato durante il presente lavoro di tesi, sono stati inseriti dei suoni d'acqua allo scopo di capire se questi potessero avere un effetto positivo anche sulla percezione del rumore indoor a bassa frequenza. È stato dimostrato che per ottenere un effetto di mascheramento il suono deve differire di almeno 3dB. Dunque, nel test sono stati aggiunti suoni che differissero rispettivamente di -3dB e -6dB rispetto al rumore dei fan coil.

Per la realizzazione del test sono state utilizzate in totale 6 registrazioni per 3 condizioni, per un totale di 18 scenari proposti, per ogni partecipante al test.

In particolare, sono stati utilizzati:

- 6 audio contenuti esclusivamente il rumore dei condizionatori;
- 6 audio con il rumore mascherato con il suono dell'acqua a -3dB;
- 6 audio con il rumore mascherato con il suono dell'acqua a -6dB.

Durante il test è stata impostata una sequenza random di tutti gli audio, per non far abituare l'udito dell'ascoltatore ai suoni proposti ed evitare eventuali errori o confondimenti.

Ad ogni domanda presente nel test è stato associato uno slider, ovvero una barra a nove sezioni, attraverso il quale l'esecutore potesse esprimere la propria risposta, cliccando con il mouse in dotazione, sul punto della barra che meglio rispecchiasse la propria percezione. In totale sono stati inseriti 14 slider per scenario. Ad ogni slider è stata associata un'opzione di risposta.

Il test è stato eseguito facendo ascoltare ai soggetti i 18 audio, corrispondenti ai 18 scenari proposti, mediante delle cuffie (Sennheiser HD 200 PRO) ed un computer portatile.

Audio registrazioni in campo	Audio fan coil esperimento	Audio acqua	Audio acqua esperimento
		dB(A)(SPL)	dB(SPL)
CDVMINS72	FC1	42,7	W39.7
			W36.7
CDVMINS6	FC2	45,2	W42.2
			W39.2
CDVMINLAB	FC3	51,6	W48.6
			W45.6
CDVMAXS7	FC4	52,4	W49.4
			W46.4
CDVMAXLAB	FC5	56,0	W53
			W50
CDVMAXS6	FC6	57,3	W54.3
			W51.3
			W1-3
			W1-6
			W2-3
			W2-6
			W3-3
			W3-6
			W4-3
			W4-6
			W5-3
			W5-6
			W6-3
			W6-6

Tabella 2 schema audio delle registrazioni in campo e rispettive registrazioni per l'esperimento

7.2.5 Sessione sperimentale

Per l'esecuzione degli esperimenti, nella test room del laboratorio SENS-i-Lab è stata allestita una postazione con banco e sedia per i partecipanti. Tutti i partecipanti alla sessione sperimentale sono stati selezionati tra gli studenti ed il personale del Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale dell'Università Vanvitelli.

Ai soggetti che hanno partecipato all'esperimento sono state fornite preliminarmente informazioni relative al test ed al suo funzionamento. Tuttavia, per non condizionare la percezione dei soggetti non è stato chiarito che tipo di suoni avrebbero ascoltato.

Una volta chiariti gli aspetti relativi al test sperimentale, i partecipanti sono stati invitati ad accomodarsi alla postazione appositamente predisposta. Ai soggetti è stato chiesto di compilare il questionario Noise Sensitivity Questionnaire (NoiSeQ) per valutare preliminarmente il proprio livello di sensibilità al rumore. Successivamente è stato sottoposto loro il test, per farlo è stato chiesto di indossare delle cuffie (Sennheiser HD 200 PRO), dotate anche di un sistema di attenuazione del rumore esterno. I soggetti sono stati lasciati soli nella test room per il tempo necessario all'esecuzione del test (25min) per evitare eventuali distrazioni.

Nella sessione sperimentale sono stati coinvolti 21 soggetti, di fasce di età comprese per la maggior parte tra i 16-25 anni.



Figura 12 Sessione sperimentale

CAPITOLO VIII

Risultati

8.1 Risultati NoiSeQ Questionnaire

Soggetto	Genere	Età	Problemi udito	% Tot.	Sensibilità al rumore
1	F	16-25	No	62	medio-alta
2	M	16-25	No	60	medio-alta
3	F	16-25	No	19	minima
4	F	16-25	No	36	media
7	M	16-25	No	88	alta
8	M	16-25	No	38	minima
9	F	16-25	No	54	media
10	F	16-25	No	39	media
11	F	16-25	No	55	media
13	M	46-55	No	68	medio-alta
14	F	16-25	No	27	minima
17	F	16-25	No	79	medio-alta
18	F	16-25	No	38	minima
28	M	16-25	No	54	medio-alta
29	F	26-35	No	57	media
30	M	36-45	No	53	media
31	F	16-25	No	66	media
32	F	16-25	No	31	minima
33	F	16-25	No	67	medio-alta
34	F	16-25	No	41	minima
35	F	26-35	No	55	media

Tabella 3 Risultati relativi al NoiSeQ questionnaire

I risultati relativi al questionario NoiSeQ sono stati estratti direttamente dal file utilizzato per la somministrazione ed in seguito riportati su un programma per l'elaborazione di fogli di calcolo per la loro catalogazione. Dai risultati del questionario è emerso che il campione di soggetti selezionato fosse abbastanza diversificato in termini di sensibilità al rumore. Infatti, alcuni soggetti presentano una

sensibilità minima, altri media o medio-alta, altri ancora alta. Inoltre, nessuno dei soggetti che ha preso parte al test, ha dichiarato problemi di udito.

8.2 Risultati test sperimentale

I risultati relativi ai test sperimentali sono stati estratti direttamente dal software Psychopy ed in seguito inseriti in un file Excel per la loro organizzazione e catalogazione.

Di seguito si riportano una serie di grafici per rappresentare in modo più esplicito l'andamento dei risultati ottenuti.

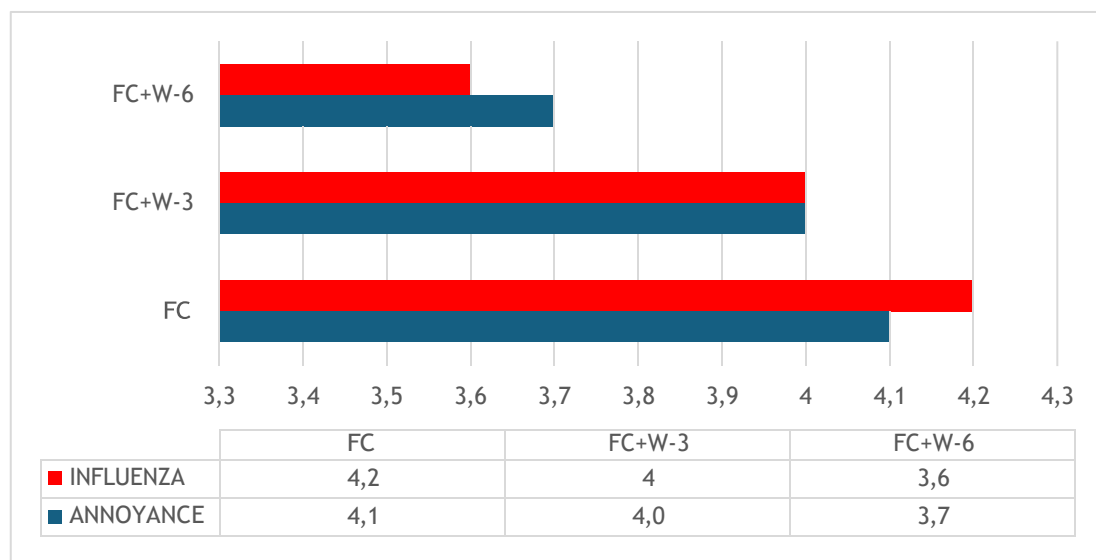


Grafico 1 Risultati relativi ad annoyance ed influenza per le tre condizioni proposte

Il grafico 1 mostra la media dei risultati ottenuti, per le domande relative a:

- influenza sulla concentrazione e produttività lavorativa (in rosso);
- annoyance (in blu).

Nel grafico è stata considerata la media delle risposte ottenute, rispetto a tutti i singoli audio, in totale 18, nelle tre condizioni proposte; ovvero:

- per gli audio contenenti esclusivamente il rumore dei fan coil (FC);
- per gli audio contenenti il rumore dei fan coil con aggiunta di un suono d'acqua a -3 dB (FC+W-3);

- per gli audio contenenti il rumore dei fan coil con aggiunta di un suono d'acqua a -6 dB (FC+W-6).

Nella tabella al di sotto del grafico è possibile osservare le medie delle risposte ottenute, divise per tipologia di audio (FC, FC+W-3, FC+W-6) e per slider, ovvero domanda (influenza ed annoyance).

Dal confronto delle risposte è emerso che, in media:

- gli audio contenenti esclusivamente i suoni dei fan coil sono risultati più fastidiosi ed influenti su concentrazione e produttività lavorativa rispetto alle altre due condizioni proposte;
- gli audio contenenti i suoni dei fan coil con aggiunta di acqua a -6 dB sono percepiti come meno fastidiosi rispetto agli audio dei fan coil con aggiunta di acqua a -3 dB.

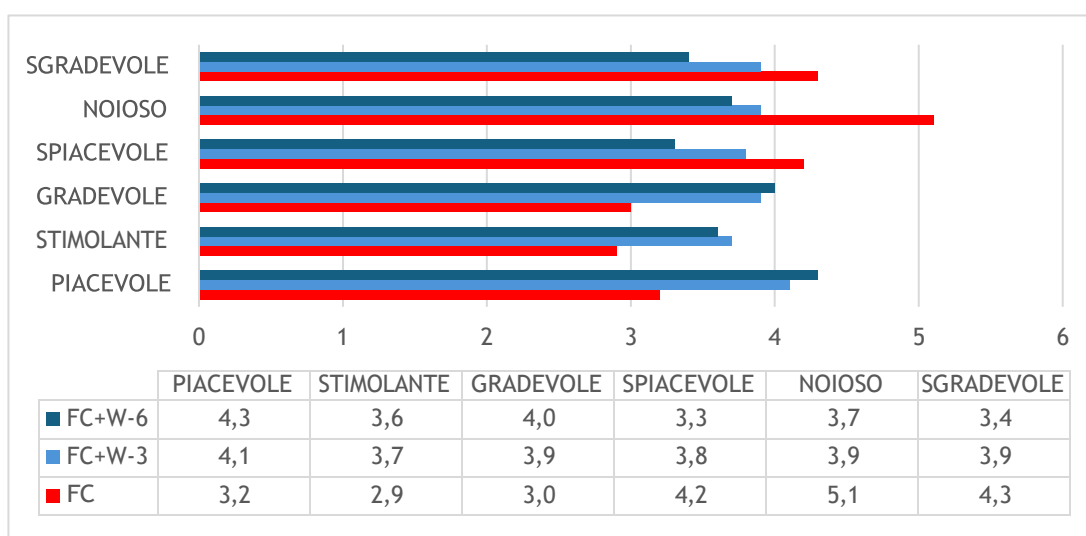


Grafico 2 Risultati relativi alla percezione dei suoni per le tre condizioni proposte

Il grafico 2 comprende le medie dei risultati relativi alla percezione dei suoni, in particolare relative a due dimensioni: valenza ed arousal, rispetto alle tre condizioni sonore proposte. In particolare, nella rappresentazione grafica è stato utilizzato:

- il colore rosso per gli audio contenenti esclusivamente il rumore dei fan coil (FC)
- il colore azzurro per gli audio contenti il suono dell'acqua a -3dB in aggiunta al rumore dei fan coil (FC+W-3)

- il colore blu per gli audio contenuti il suono dell'acqua a – 3dB in aggiunta al rumore dei fan coil (FC+W-6)

Sono stati selezionati tre aggettivi positivi (gradevole, stimolante, piacevole) e tre negativi (sgradevole, noioso, spiacevole) e, come si evince dal grafico di cui sopra, i valori delle risposte relative agli aggettivi negativi sono più elevati, rispetto ai corrispettivi positivi, con un valore maggiore associato all'aggettivo “noioso”. Inoltre, si può dedurre che:

- gli audio contenenti esclusivamente i suoni dei fan coil risultano più, spiacevoli, noiosi e sgradevoli rispetto a quelli contenenti i suoni dell'acqua;
- gli audio contenenti i suoni dei fan coil con aggiunta di acqua a -6 dB hanno ottenuto dei valori più bassi per gli items negativi (quali spiacevole, noioso, sgradevole) rispetto ai corrispettivi audio a -3 dB.

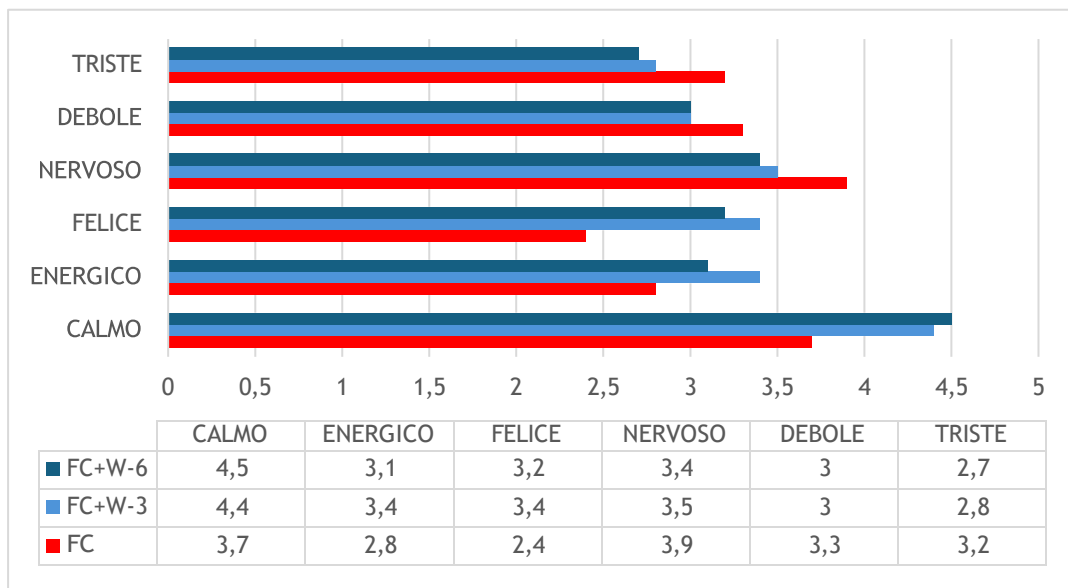


Grafico 3 Risultati relativi alla salienza emotiva dei suoni per le tre condizioni proposte

Il grafico 3 illustra le risposte associate agli items selezionati per descrivere la salienza emotiva riguardo le tre condizioni sonore proposte.

Anche per il presente grafico sono stati utilizzati i medesimi colori:

- rosso per gli audio contenenti esclusivamente il rumore dei fan coil (FC)

- azzurro per gli audio contenenti il suono dell'acqua a - 3dB in aggiunta al rumore dei fan coil (FC+W-3)
- blu per gli audio contenenti il suono dell'acqua a - 3dB in aggiunta al rumore dei fan coil (FC+W-6)

Gli items “positivi” (ovvero calmo, energico, felice) hanno ottenuto valori più elevati negli audio contenenti i suoni dell'acqua (FC+W-3, FC+W-6), rispetto agli audio contenenti esclusivamente il rumore del fan coil (FC). In particolare, l'aggettivo “calmo”, ha registrato un valore più elevato, in termini di risposte dei soggetti. Dunque, più soggetti hanno giudicato come calmanti i suoni contenenti l'acqua, nonostante il suono dei fan coil in sottofondo.

Per gli items “negativi” (ovvero nervoso, debole, triste) il valore più elevato è stato raggiunto dall'aggettivo “nervoso” associato agli audio contenenti esclusivamente i suoni dei fan coil. Si sottolinea inoltre che per gli audio contenenti i suoni d'acqua, sia a -3dB che a -6dB, i valori associati agli items negativi risultano meno elevati.

Dunque, possiamo concludere che:

- a) gli audio che incidono negativamente sull'emozione, evocando sensazioni negative, sono in misura maggiore quelli contenenti esclusivamente il suono dei fan coil (FC);
- b) gli audio contenenti il suono dell'acqua (sia FC+W-3, sia FC+W-6) sono maggiormente associati a sensazioni positive.

Si fa notare che diversi soggetti, una volta terminato il test hanno affermato di aver provato maggiore fastidio con il passare del tempo, dopo aver ascoltato i suoni per diversi minuti. Di conseguenza si suggerisce che uno studio che coinvolga una popolazione più ampia e con una durata maggiore, potrebbe contribuire significativamente allo studio dell'acustica negli ambienti indoor.

CAPITOLO IX

Conclusioni

I rumori in ambiente indoor, anche moderati, nonostante non causino manifestazioni cliniche a carico dell'organismo umano. Possono minare il benessere degli individui esposti.

Il rumore proposto, ovvero il rumore dei condizionatori, in diverse modalità di funzionamento, è stato valutato negativamente dalla maggior parte dei soggetti, non solo da coloro i quali, in base al questionario precedentemente somministrato, hanno presentato una sensibilità al rumore elevata, ma anche da chi ha presentato una sensibilità uditiva inferiore.

Gli esperimenti condotti supportano le conclusioni per le quali il rumore dei fan coil, può avere effetti sulla produttività e sul benessere dei lavoratori negli uffici. In quanto può generare fastidio, può risultare noioso e può indurre nervosismo.

Infine, è interessante notare come il suono dell'acqua, addizionato al medesimo rumore dei fan coil, facesse risultare quest'ultimo più gradevole e suscitasse, anche sensazioni positive. Dunque, introdurre dei suoni naturali, in particolar modo dell'acqua in un contesto lavorativo rumoroso, magari durante le pause, potrebbe costituire una strategia per migliorare il benessere ed il comfort ambientale.

Allegati

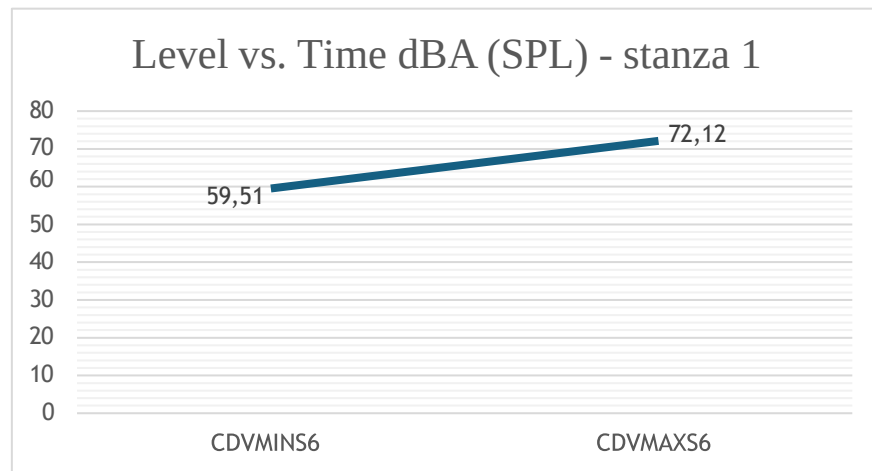


Grafico 4 *Livello* in dB (SPL) registrazioni fan coil da v. min a v. max

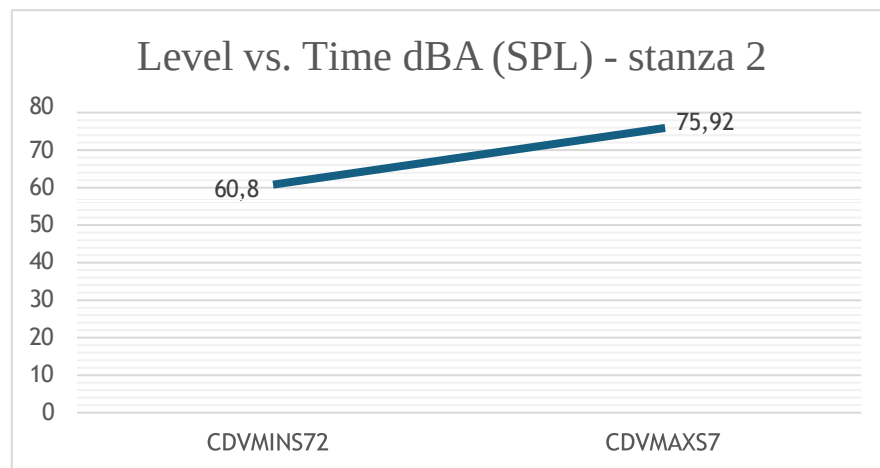


Grafico 5 *Livello* in dB (SPL) registrazioni fan coil da v. min a v. max

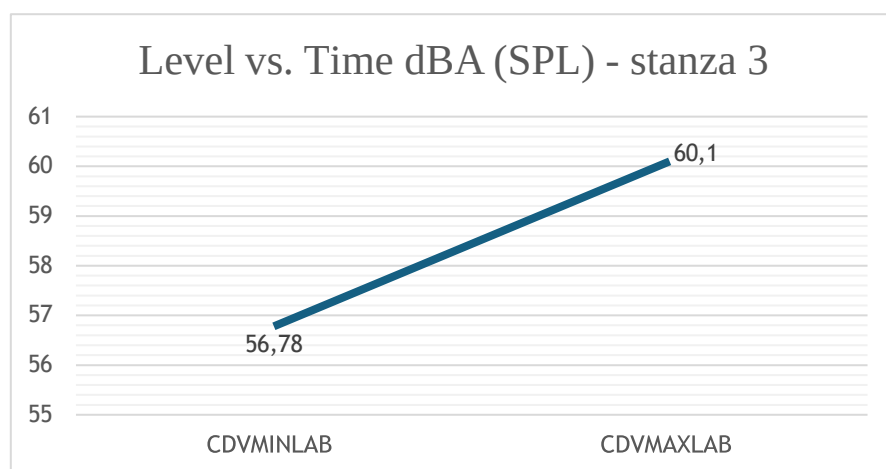


Grafico c *Livello* in dB (SPL) registrazioni fan coil da v. min a v. max

STANZA I



INFORMAZIONI FAN COIL

Modello: climatizzatore DC inverter
- senza unità outdoor

Marca: Argo®

Modalità di funzionamento: cool

Posizione: nord ovest stanza

Dimensione stanza: 540x580

REGISTRAZIONI

velocità min: 59,51 dB(A)

velocità mid: 63,17dB(A)

velocità max: 72,17 dB(A)

Figura 13 Fan coil registrato

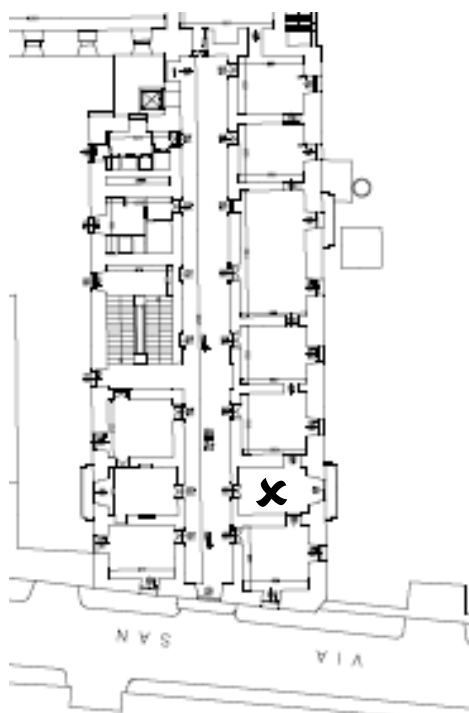


Figura 14 Luogo dei rilevamenti (il simbolo ✕ indica la stanza in cui sono state eseguite le registrazioni)

STANZA II



INFORMAZIONI FAN COIL

Modello: climatizzatore DC inverter
- senza unità outdoor

Marca: Argo®

Modalità di funzionamento: cool

Posizione: nord ovest stanza

Dimensione stanza: 520x580

REGISTRAZIONI

velocità min: 60,80 dB(A)

velocità mid: 62,46 dB(A)

velocità max: 75,92 dB(A)

Figura 15 Fan coil registrato

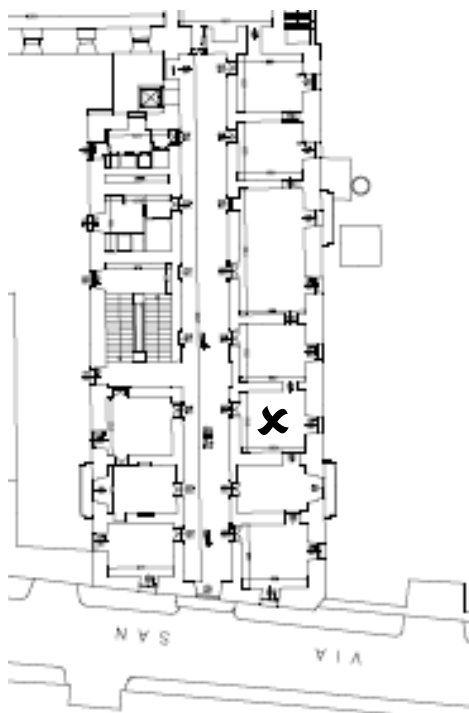


Figura 16 Luogo dei rilevamenti (il simbolo **X** indica la stanza in cui sono state eseguite le registrazioni)

STANZA III



Figura 17 Fan coil registrato

INFORMAZIONI FAN COIL

Modello: climatizzatore

Marca: Rhoss®

Modalità di funzionamento: cool

Posizione: nord stanza

Dimensione stanza: 4x4x4

REGISTRAZIONI

velocità min: 56,78 dB(A)

velocità mid: 59,14 dB(A)

velocità max: 60,10 dB(A)

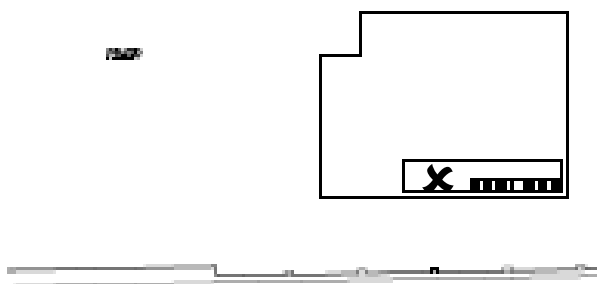


Figura 18 Luogo dei rilevamenti (il simbolo ✕ indica la stanza in cui sono state eseguite le registrazioni)

Bibliografia

1. Official Records of World Health Organization No. 2, p. 100. International Health Conference, New York 19 June - 22 July 1946.
2. Lamancusa J. S., *Noise control Human Response to Sound*, Penn State, 2000.
3. Tesarzl M., Kjellbergl A., Landstrom V., Holmberg K., *Subjective Response Patterns Related to Low Frequency Noise*, Journal of Low Frequency Noise, 1997.
4. Alessio L., Apostoli P., *Manuale di medicina del lavoro e igiene industriale*; per Tecnici della Prevenzione, Piccin 2010.
5. Capasso A., Renzulli L., *Manuale per la gestione dei rischi nei luoghi di lavoro*, Seconda Università degli Studi di Napoli (AOU), Napoli, agosto 2009.
6. Mutti A., Corradi M., *Lezioni di medicina del lavoro*, Nuova Editrice Berti, 2014.
7. Spagnolo R., *Acustica Fondamenti e applicazioni*, Utet 2015.
8. *La valutazione del rischio rumore*, INAIL 2015.
9. Pavone F., Voza N., Pannocchia A., Fogola J., Grasso D., Corgnati D., *Analisi delle migliori pratiche e tecnologie disponibili nei settori della misurazione e registrazione del rumore e in quello della Psicoacustica*. Provincia di Torino, Arpa Piemonte., 2013.
10. De Campora E., Paganini P., *Otorinolaringoiatria*, Elviser 2014.
11. Campurra G., Rotella A., *Il rischio rumore negli ambienti di lavoro*. IPSOA 2013.
12. Mehrotra A., Shukla SP., Shukla AK., Manar MK., Singh SK., Mehrotra M. A *Comprehensive Review of Auditory and Non-Auditory Effects of Noise on Human Health*. Noise Health, 2024. DOI: [10.4103/nah.nah_124_23](https://doi.org/10.4103/nah.nah_124_23)
13. Callegari A., Franchini A., *Rassegna degli effetti derivanti dall'esposizione al rumore*, ANPA, Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi.
14. Gazzetta Ufficiale n. 169, Serie Generale, 21/07/2008
15. Basner M., Babisch W., Davis A., Brink M., Clark C., Janssen S., Stansfeld S. *Auditory and non-auditory effects of noise on health*. Lancet, 2014. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61613-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61613-X).
16. Selye, H. Stress in health and disease. Butterworths, Boston, 1976.

17. Setz C, Arnrich B, Schumm J, La marca R, Troster G, *Discriminating stress from cognitive load using a wearable EDA device*. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.*, 2010. DOI: [10.1109/TITB.2009.2036164](https://doi.org/10.1109/TITB.2009.2036164)
18. Golmohammadi R., Darvishi E., Motlagh MS., Faradmal J., Aliabadi M., Rodrigues MA. *Prediction of occupational exposure limits for noise-induced non-auditory effects*. *Appl Ergon*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103641>.
19. Decreto Legislativo 9 aprile 2008 n. 81, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie generale n.101 del 30/04/2008, suppl. ordinario n.108
20. D'Ambrosio Alfano F.R., Piterà L.A., *Qualità globale dell'ambiente interno*. Editoriale Delfino, 2014.
21. Crawford JO, Bolas SM. Sick building syndrome, work factors and occupational stress. *Scand J Work Environ Health*, 1996. <https://doi.org/10.5271/sjweh.138>
22. Leo Beranek *Criteria for Office Quieting Based on Questionnaire Rating Studies*, 1956.
23. Leo Beranek, R.B. Newman *Speech interference levels as criteria for rating background noise in offices*, 1950.
24. Tocci G.C., Cavanaugh Tocci Associates, *Room Noise Criteria—The State of the Art in the Year 2000*.
25. Cirillo E., D'Alba M., Martellotta F. *Rumore e attività lavorativa negli uffici Noise and office work*. *Med Lav.*, 2006.
26. Iannace G., Ciaburro G., and Trematerra A. *Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Noise Detection in Open-Plan Offices Using Recursive Partitioning Buildings*, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings8120169>
27. Bhatia A., *HVAC Systems Noise Control*
28. Masullo M., Maffei L., Sorrentino F., Ruggiero G. Rapuano M. *Effects of fan coils noise on cognitive performances in offices*. ICSV25, Hiroshima, 8-12 July 2018. <https://hdl.handle.net/11591/390775>
29. Sobotová L., Jurkovicová J., Voleková J., Aghová L. *Community noise annoyance risk in two surveys*. *Int J Occup Med Environ Health*, 2001. PMID: 11548072.
30. Kroesen M., Molin EJ., van Wee B. *Measuring subjective response to aircraft noise: the effects of survey context*. *J Acoust Soc. Am.* 2013. <https://doi.org/10.1121/1.4768795>

31. Douglas O, Murphy E. *Source-based subjective responses to sleep disturbance from transportation noise*. Environ Int., 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.030>
32. Belojević G, Ohrström E, Rylander R., *Effects of noise on mental performance with regard to subjective noise sensitivity*. Int Arch Occup Environ Health. DOI: [10.1007/BF00378288](https://doi.org/10.1007/BF00378288)
33. International Organization for Standardization (ISO). ISO/TS 12913-3:2019, Acoustics Soundscape - Part 3: Data analysis. Geneva, Switzerland, 2019.
34. Schutte, M., A. Marks, E. Wenning, and B. Griefahn 2007. The development of the noise sensitivity questionnaire. Noise & Health, 9(34):15-24
35. Masullo M., Maffei L., Iachini T., Rapuano M., Cioffi F., Ruggiero G., Ruotolo F., *A questionnaire investigating the emotional salience of sounds*. Elsevier 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108281>
36. Bert De Coensel, Sofie Vanwetswinkel, Dick Botteldooren; Effects of natural sounds on the perception of road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011. <https://doi.org/10.1121/1.3567073>
37. Lugten, M., Karacaoglu, M., White, K., Kang, J., Steemers, K. Improving the soundscape quality of urban areas exposed to aircraft noise by adding moving water and vegetation Journal of the Acoustical Society of America, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.5079310>
38. Laurent Galbrun, Tahrir T. Ali; Acoustical and perceptual assessment of water sounds and their use over road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2013; <https://doi.org/10.1121/1.4770242>
39. Jian Li, Massimiliano Masullo, Luigi Maffei, Aniello Pascale, Chi-kwan Chau, Minqi Lin, *Improving informational-attentional masking of water sound on traffic noise by spatial variation settings: An in-situ study with brain activity measurements*. Applied acoustics, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2024.109904>
40. Jun Cai, Jiahang Liu, Nishuai Yu, Binyang Liu, Effect of water sound masking on perception of the industrial noise, Applied Acoustics, 2019. DOI: [10.1016/j.apacoust.2019.02.025](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.025)