

# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



**Scuola Politecnica e delle Scienze di Base**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE**

**Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Tesi di Laurea**

**Sound Quality: Ricerca e sviluppo di una procedura per l'individuazione di correlazioni esistenti tra descrittori oggettivi legati alla rumorosità di motori elettrici e disturbo percepito**

**Relatore**

**DOTT. ING. RAFFAELE DRAGONETTI**

**Candidato**

**MARIO CELENTANO**

**MATR. 518/578**

**Anno accademico 2013/2014**

Il rumore emesso da macchine in movimento rappresenta una fonte di fastidio. Un primo tentativo per descrivere il rumore emesso è attraverso indici che esprimono l'energia emessa come il livello di pressione sonora. Negli ultimi anni ha acquisito sempre maggiore importanza il concetto di **Sound Quality**, cioè l'interconnessione fra un prodotto industriale e la qualità del rumore emesso da tale prodotto. Il suono emesso può essere considerato un vero e proprio **elemento di design**. La qualità sonora può essere descritta mediante parametri psicoacustici quali:

**Loudness, Pitch, Sharpness, Roughness.**

E' ancora poco chiaro come questi elementi della qualità del suono possano combinarsi tra di loro al fine di definire un indice totale di qualità. Alcuni studiosi hanno evidenziato una correlazione tra alcuni di questi descrittori e un giudizio sulla **fastidiosità** percepita di un suono.



Fig. 1 – Motore elettrico

In questo lavoro di tesi è stata valutata la qualità delle emissioni sonore di motori elettrici a corrente continua. I motori elettrici sono stati messi a disposizione dalla DENSO Thermal System S.p.A.(Fig.1) e vengono attualmente utilizzati negli impianti di condizionamento di autovetture in commercio.

In particolare si è cercata una procedura per **correlare alcuni dei parametri della sound quality alla rumorosità emessa dai motori elettrici mediante test psicoacustici**. In una prima fase si sono studiate e valutate le emissioni sonore di 45 campioni di motori elettrici in funzione dei vari descrittori psicoacustici. In figura 2 si riportano il segnale nel dominio della frequenza e del tempo in cui è possibile apprezzare le componenti armoniche legate al numero di giri del motore. Dopo una dettagliata analisi è stato riscontrato che le prime armoniche sono modulate in ampiezza con un periodo direttamente proporzionale al periodo di rotazione, mentre le componenti alle alte frequenze sono modulate anche in frequenza con una traslazione che aumenta all'aumentare della frequenza.

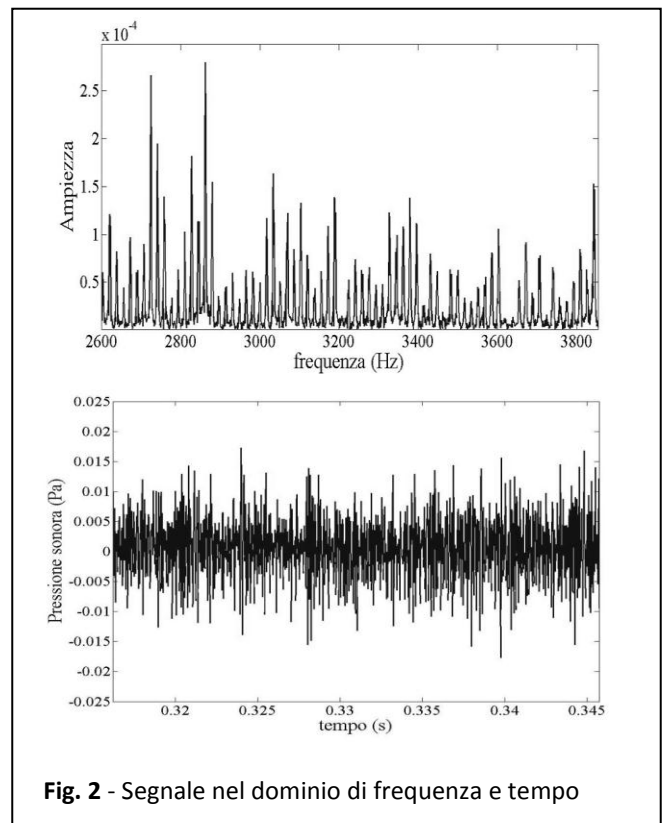


Fig. 2 - Segnale nel dominio di frequenza e tempo

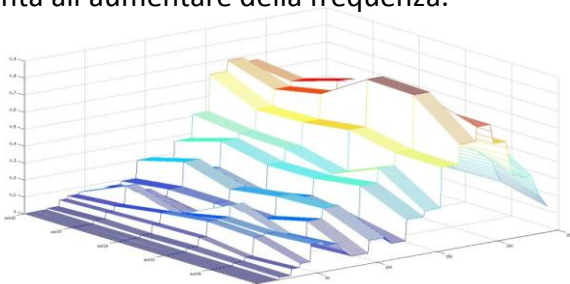


Fig.3 - Loudness specifica di tutti i motori

In figura 3 invece è riportato il diagramma per la loudness specifica di tutti i motori analizzati.

Analogamente si è proceduto al calcolo della Sharpness.

Di seguito sono state analizzate anche la PITCH (tonality) e la ROUGHNESS (rugosità) (fig. 4).

Tale calcolo è stato molto più complesso perché esistono diversi algoritmi per la loro stima e di non semplice interpretazione.

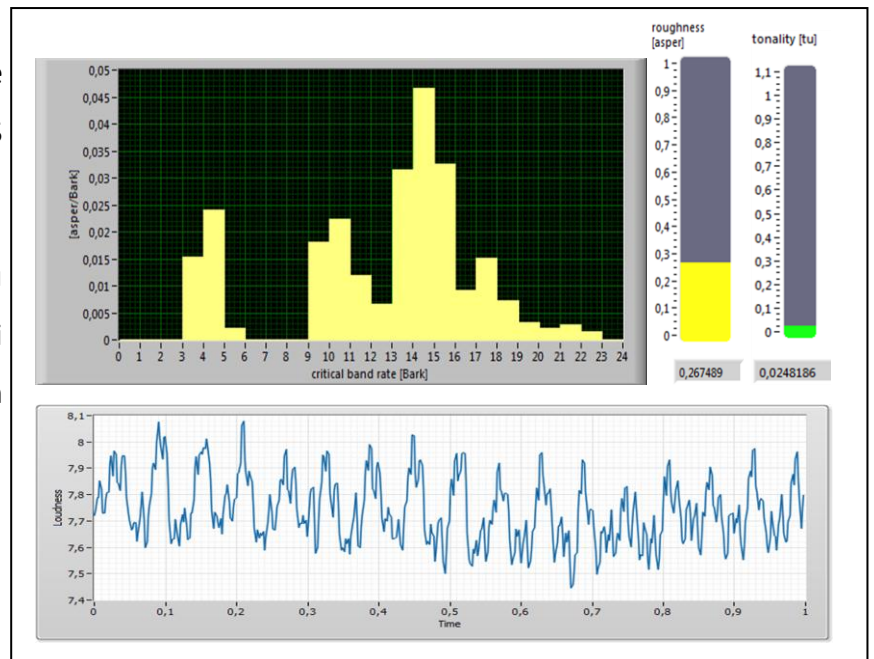


Fig. 4 - roughness, pitch e time loudness di un motore in esame

Quindi se vi sono metodi numerici ed algoritmi in grado di calcolare in maniera relativamente facile loudness e sharpness, non può dirsi altrettanto **per roughness e pitch**. Inoltre da una indagine nella letteratura è emerso che la “fastidiosità” è ben correlata alla “loudness” ed alla “sharpness”, ma poche sono le indagini effettuate sull’influenza della “roughness” e della “pitch”. Da una analisi preliminare si è visto come **non si può affermare a priori quanto un suono sia gradevole o sgradevole valutando solo i descrittori oggettivi**

Si riporta nella seguente figura 5 lo stato dell’arte dei metodi esistenti.

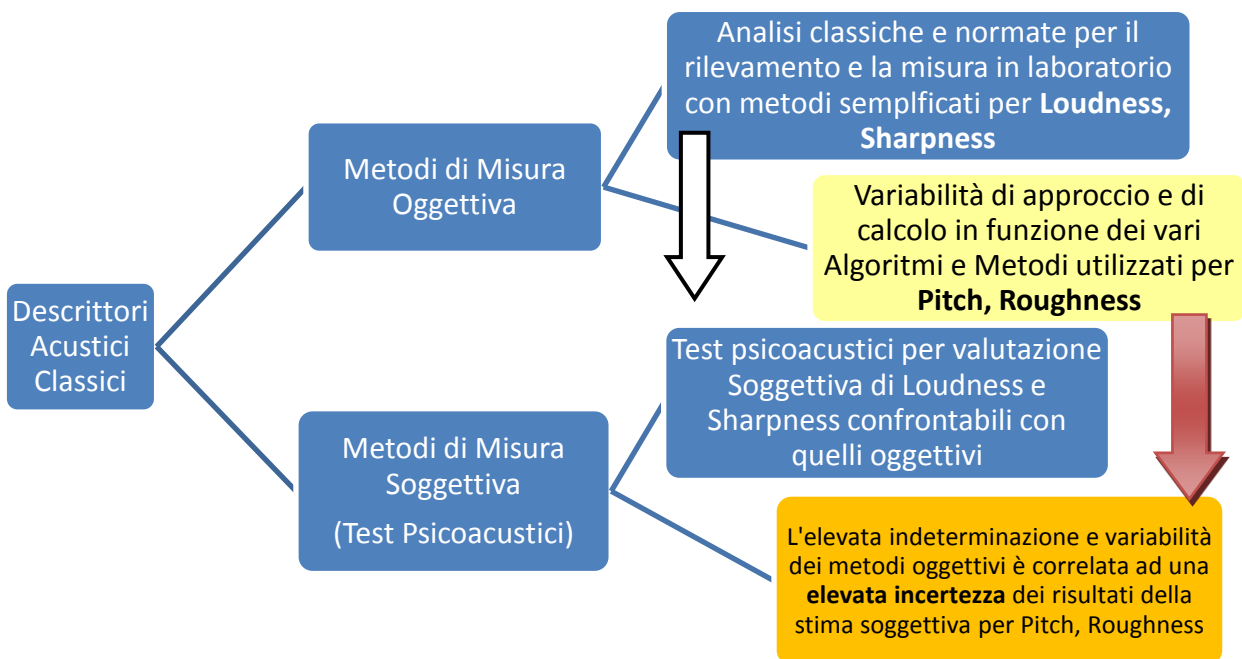


Fig.5 - Metodi acustici e psicoacustici

Nel caso specifico, dalle registrazioni ascoltate, “ad *orecchio*” ogni motore analizzato suona in maniera diversa, anche se sono stati classificati dal produttore come “uguali”.

Pertanto ci si è chiesto:

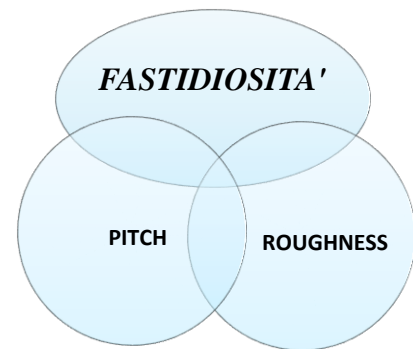
1. Quale parametro PSICOACUSTICO è capace di quantificare questa diversità?
2. Quale parametro PSICOACUSTICO caratterizza la FASTIDIOSITA'?

### Test Psicoacustico

E' stato creato un **modello di test psicoacustico** attraverso un questionario per individuare come i descrittori oggettivi dei motori in esame vengono riconosciuti e discriminati dai soggetti (cavie).

E' stata indagata l'influenza della “pitch” e della “roughness” sulla “fastidiosità” generale di un rumore somministrato all'ascoltatore.

A tal fine si e' deciso di studiare prima le relazioni esistenti tra descrittori acustici e psicoacustici, e poi di costruire un **TEST PSICOACUSTICO** che potesse spiegare in che modo questi descrittori si influenzano e si relazionano a vicenda.



Per la scelta del test quindi è stato necessario effettuare innanzitutto una **scelta semantica tra i descrittori scelti**, ed individuare un modello tale da poter far emergere quali delle differenze tra i valori misurati ricorrevano in maniera più evidente.

L'indagine, di carattere soggettivo, consiste nella somministrazione di questionari in formato cartaceo con relativo ascolto delle registrazioni e risposte su un apposito modulo.

E' stato a tal fine creato un documento, nel quale si fornivano tutte le informazioni necessarie allo svolgimento del test preliminare, in cui si voleva valutare la percezione della PITCH della ROUGHNESS e della FASTIDIOSITA'.

In seguito ai test preliminari tale documento è stato modificato, ottimizzando la somministrazione dei rumori e la durata del test. Inoltre mentre in un primo approccio sono state elaborate delle domande secondo una griglia di risposta qualitativa, in seguito è stata rivista la tipologia di questionario preferendo un metodo di correlazione a coppie.

## Scelta dei Motori

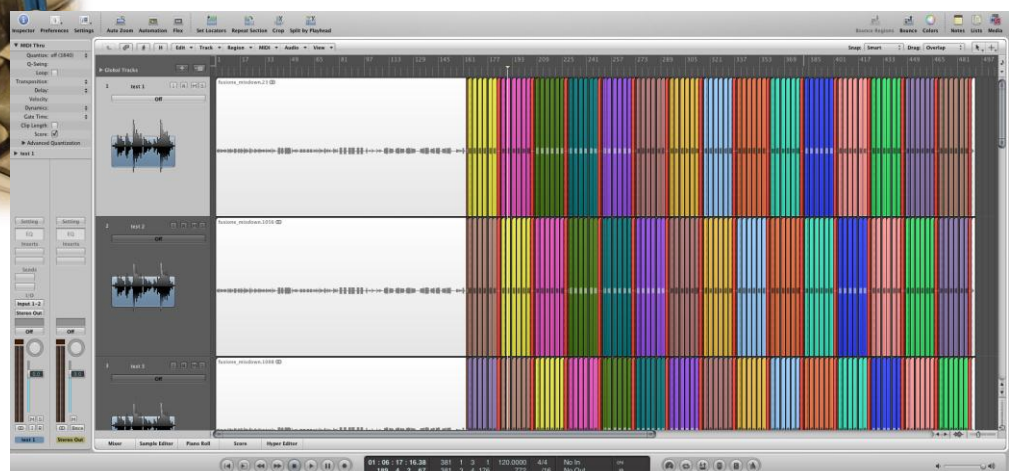
Per la scelta dei motori quindi si sono misurati tutti i 45 motori, ne sono stati selezionati 14, quelli che hanno la stessa intensità sonora loudness, e stessa sharpness. Di questi ne sono stati scelti 6, ovvero quelli che da una prima somministrazione dei test si sono dimostrati meno ambigui nelle risposte delle prime cavie.



La randomizzazione delle schede e dei test proposti sono state effettuate secondo uno schema che permette di non ripetere gli ascolti degli stessi motori su ogni sequenza, e sottopone ogni cavia ad un test differente da quello a cui vengono sottoposte le cavie successive.

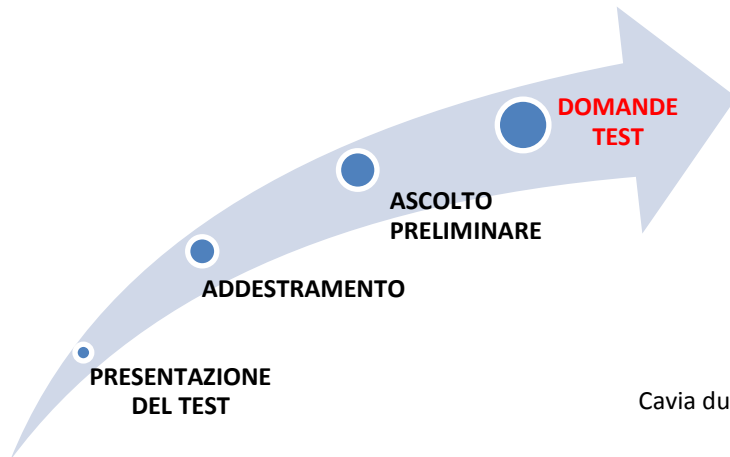
## Registrazione del Test

Le registrazioni dei motori sono organizzate attraverso un programma professionale di gestione audio dedicato (LogicAudio). Ogni sequenza di registrazione contiene i frame più caratteristici dei rumori. Al fine di non influenzare la cavia, tutto il TEST è stato registrato in camera anecoica, temporizzando opportunamente le domande proposte mediante segnali acustici. Ad ogni cavia veniva somministrato quindi un file differente in modo da randomizzare gli ascolti, mediante cuffia audiometrica.



## Sperimentazione

A valle di tutte le modifiche effettuate e della registrazione definitiva, lo svolgimento del progetto, nella sua configurazione finale, prevede le fasi illustrate di seguito:



Cavia durante lo svolgimento del test in camera anecoica

**PRESENTAZIONE DEL TEST:** Il questionario chiede di valutare il **rumore** di alcuni motori elettrici, nel caso in esame tre caratteristiche: *PITCH, ROUGHNESS, E FASTIDIOSITA'*.

**ADDESTRAMENTO:** Per una maggior comprensione dei tre descrittori (*pitch, roughness, fastidiosità*) in una fase detta di "addestramento" la cavia prende confidenza con questi descrittori mediante suoni appositamente costruiti in cui vengono marcate le differenze.

**ASCOLTO PRELIMINARE:** Al fine di imparare a riconoscere le differenze, dopo la fase di "addestramento" vengono proposti dei confronti a coppie in cui la cavia inizia a prendere confidenza con il questionario.

**DOMANDE TEST:** In questa fase inizia il test di ascolto vero e proprio. Le 15 registrazioni dei motori vengono presentate a coppie secondo la sequenza descritta precedentemente e la cavia rispondendo di volta in volta, indica con una croce la propria decisione secondo una tabella comparativa.

Indica nella tabella con una crocetta il rumore:

che ha maggiore Pitch;  
che ha maggior Roughness;  
che è più fastidioso tra i due.

\*\*\*\*\*Ascolto toni

Test preliminare 1	Tono - 1	Tono - 2
Pitch	X	
Roughness		X
Fastidiosità	X	

Tabella comparativa delle risposte del Test

Sesso: M  F  Et : \_\_\_\_\_  
 Data: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_ Ora: \_\_\_/\_\_\_  
 Test N : \_\_\_\_\_

Buongiorno, ti chieder  di valutare il **rumore** di alcuni motori elettrici.  
 All'inizio ci sar  una **fase di Ascolto Preliminare** in cui prenderai  
 descrittori che dovrai riconoscere per la valutazione del rumore. In  
 indicare problematiche sul volume, riascoltare i suoni, chiedere eventuali  
 interrompere la prova.

In ogni singola prova ti far  ascoltare per due volte le registrazioni. Ogni  
 composta da 2 suoni. Dopo l'ascolto esprimerai la tua opinione sul foglio  
 fornito.

Una volta iniziata la **Prova di Ascolto**, il test non potr  essere interrotto  
 completamento.

Ti chieder  di valutare tre caratteristiche: "**Roughness, Pitch e Fastidiosit **"  
 - la **Roughness**, che serve per esprimere un giudizio sulla "Rugosit " di un  
 - la **Pitch** che serve ad esprimere un giudizio sulla "Tonalit " di un suono  
   pi  acuto);  
 - ed infine un giudizio sulla **Fastidiosit ** del suono.

Per familiarizzare con il descrittore Roughness ascolterai due suoni, ripetuti  
 senza rispondere sul questionario. Noterai che il primo suono ha meno Roughness  
 secondo suono ha maggiore Roughness.

\*\*\*\*\*Ascolto

Adesso ascolterai due suoni, ripetuti per due volte; il primo   pi  acuto e il secondo  
 rispondere sul questionario.  
 \*\*\*\*\*Ascolto

Ora, per allenarti a rispondere al test, ascolterai altri due suoni ripetuti per tre volte.  
 Ad ogni ripetizione avrai il tempo per indicare il descrittore predominante tra i due suoni.  
 Non indicare mai un'uguaglianza.  
 Al termine dell'ascolto sentirai un segnale acustico ed avrai alcuni secondi per completare il quesito.  
 Indica nella tabella con una crocetta il rumore:  
**che ha maggior Pitch;**  
**che ha maggior Roughness;**  
**che   pi  fastidioso tra i due.**  
 \*\*\*\*\*Ascolto toni

Test preliminare 1	Tono -1	Tono -2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		

Ora ti far  ascoltare una coppia di motori, ripetuti per tre volte, simili a quelli del test vero e proprio.  
 ascolto focalizza la tua attenzione su un descrittore e rispondi al questionario. Al termine dell'ascolto  
 segnale acustico, avrai alcuni secondi per completare le tue risposte.  
 \*\*\*\*\*Ascolto motori 1

Test preliminare 2	Motore 1	Motore 2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		

\*\*\*\*\*Ascolto motori 2

Test preliminare 3	Motore 1	Motore 2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		

Adesso inizia il test di ascolto vero e proprio, ascolterai le coppie di motori rispondendo di volta in volta.  
 Il test da adesso non pu  essere interrotto.

\*\*\*\*\*Ascolto Test

Test n'1	Motore 1	Motore 2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		
Test n'2	Motore 1	Motore 2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		
Test n'3	Motore 1	Motore 2
Pitch		
Roughness		
Fastidiosit�		

.... Etc. fino ad arrivare al test n' 15

Fig. 7 – Test Psicoacustico Definitivo

L'implementazione di questo test psicoacustico ha condotto alla individuazione di correlazione tra descrittori oggettivi e disturbo soggettivo percepito.

Sono stati effettuati 115 Test Psicoacustici, e dalla analisi dei risultati in particolare,   emerso che la "**fastidiosit **"   influenzata dalla "pitch" e in minor valore dalla "roughness".

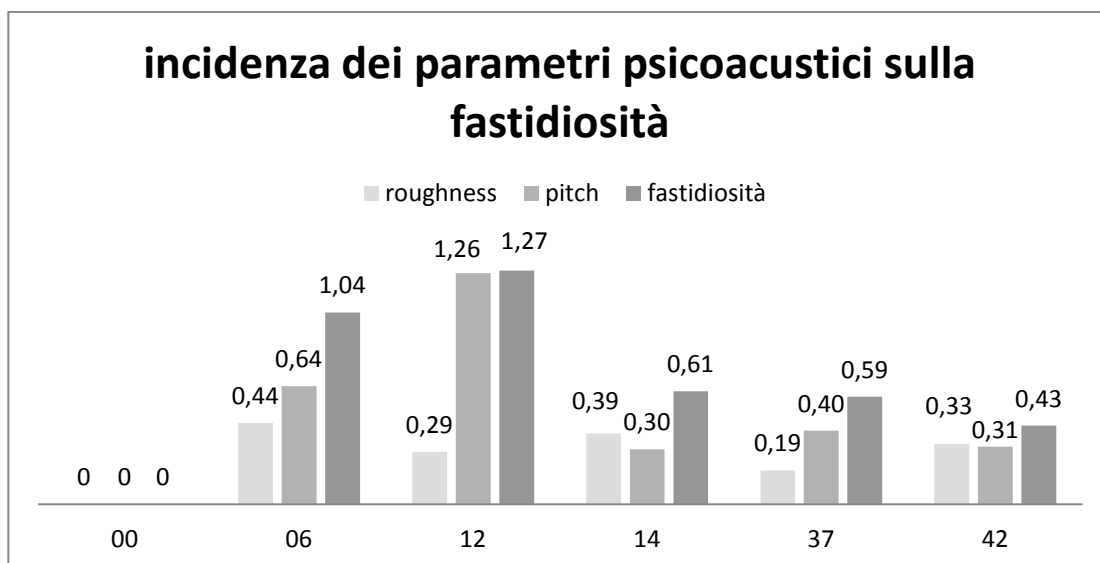


Tabella dei risultati ottenuti a valle della sperimentazione