

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN
INGEGNERIA PER L’AMBIENTE E IL TERRITORIO**



**Caratterizzazione acustica oggettiva e
soggettiva di motori elettrici a corrente continua**

TIROCINIO FORMATIVO PRESSO

*Dipartimento di Energetica Termofluidodinamica applicata
e Condizionamenti ambientali*

ABSTRACT

TUTOR ACCADEMICO – RELATORE

Dott. Ing.

Raffaele DRAGONETTI

CANDIDATO

Sabato DI FILIPPO

Matr 324/266

CORRELATORE

Testing Department Senior Manager

DENSO Thermal System spa

Ing. **Luca SCHINARDI**

Anno Accademico 2011/2012

Premessa

Negli ultimi decenni la qualità del prodotto ha assunto una rilevanza fondamentale nei processi produttivi. In fase di progettazione e produzione è impossibile prescindere da essa.

Le chiavi del successo di un prodotto nel mercato non sono solo le sue caratteristiche tecniche ma anche il grado in cui il prodotto riesce a soddisfare il consumatore. Un'automobile è accattivante non solo per il ridotto consumo di carburante ma anche per la rifinitura degli interni; un aspirapolvere viene scelto non solo per la capacità di aspirare la polvere ma anche per l'ergonomia dell'impugnatura o il design esterno.

Tra i vari aspetti, che rendono un prodotto qualitativamente valido, il suono emesso è sicuramente uno dei più importanti. Spesso un suono gradevole o accattivante è indice di garanzia del prodotto; un rumore sgradevole invece è sinonimo di scarsa qualità. Il consumatore identifica il suono come uno dei principali criteri nel giudicare la qualità complessiva di un prodotto.

In questo ultimo decennio il comfort acustico-vibrazionale è diventato un requisito essenziale nel settore dei trasporti, in special modo nel campo automobilistico. Basti pensare ad un'auto progettata qualche decennio addietro per riscontrare che, rispetto alle vetture odierne, l'abitacolo è più rumoroso.

Nelle auto moderne vi è quindi una migliore insonorizzazione del motore, in particolare in quelle elettriche il rumore è pressoché assente. L'assenza del rumore del motore, che era la principale fonte di rumore, lascia spazio ad altre fonti di disturbo quali: rumori aerodinamici, sorgenti interne, scricchiolii, sibili, fruscii.

Anche il rumore del sistema di climatizzazione può essere fonte di fastidio. Lo scopo di questo elaborato è stato l'analisi del rumore emesso dal motore elettrico del sistema di climatizzazione, sia da un punto di vista metrologico che di analisi del segnale. In particolare è stata quantificata la qualità del suono emesso attraverso un indice definito "Psychoacoustic Annoyance".

Comunemente si tende a collegare la parola suono a qualcosa di piacevole e la parola rumore a qualcosa di fastidioso, ma questa differenza è piuttosto soggettiva e legata al contesto in cui un suono o un rumore sono inseriti. Il rombo del motore di un'auto di formula 1 può essere un rumore fastidioso oppure un bellissimo suono; dipende se chi lo ascolta è un appassionato di corse automobilistiche oppure un amante della natura e della

tranquillità. Queste sensazioni sono connesse ad una sensibilità individuale e dunque, per distinguere un suono da un rumore, non si può prescindere dai descrittori soggettivi.

Studiare la qualità del suono è un processo molto sofisticato, perché implica lo studio combinato sia del processo di elaborazione del suono da parte dell'orecchio sia dell'attributo che il cervello dà al segnale analizzato. Per questo studio i comuni descrittori, quali la pressione e la potenza sonora, non sono più sufficienti.

In particolare il lavoro svolto può essere così diviso: una prima parte rivolta alla caratterizzazione oggettiva di un rumore definito accettabile rispetto ad un altro definito non idoneo ed in una seconda parte rivolta alla caratterizzazione degli aspetti soggettivi che identificano un rumore più o meno gradevole.

Il modulo elettro-ventilatore analizzato è prodotto dalla *DENSO Thermal System spa*, che sviluppa, produce e vende sistemi di condizionamento, sistemi di raffreddamento motore, scambiatori di calore, radiatori e compressori per auto e veicoli commerciali e industriali.

Misure sperimentali

Il modulo elettro-ventilatore, alimentato a corrente continua, svolge la funzione di generare la portata d'aria che, attraverso il gruppo climatizzatore, viene inviata nell'abitacolo del veicolo al fine di realizzarne il condizionamento dell'aria.

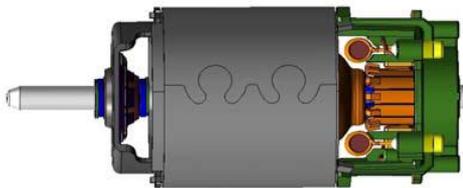


Figura 1 : Schema del motore



Figura 2 : Foto del motore

Sono stati presi in esame 20 motori già classificati dalla DENSO come idonei e non idonei mediante una propria procedura interna. Le misure sono state condotte presso la camera anecoica del D.E.TE.C. (Dipartimento di Energetica TERmofluidodinamica

applicata e Condizionamenti ambientali) al fine di limitare il rumore di fondo e l'influenza dell'ambiente di misura.



Figura 3 : Modalità di registrazione

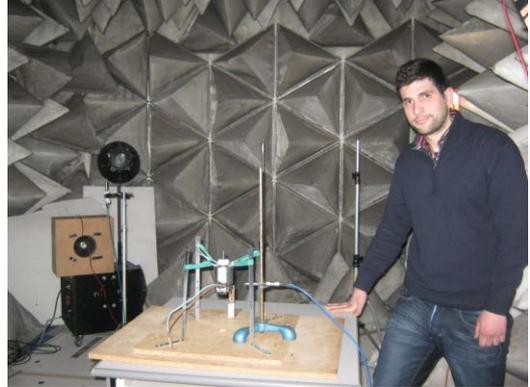


Figura 4 : Camera anecoica

Come si evince dalla figura 3, il motore è stato sospeso tramite 4 supporti elastici ed alimentato con una tensione di 4.2 Volt, corrispondente ad una velocità di rotazione di 1272 rpm. Ogni acquisizione ha avuto una durata di 30 secondi, tempo sufficiente a caratterizzare una periodicità di emissione, che, come si vedrà in seguito, è di circa 21.2 Hz. In questa fase di misura è stata messa a punto una procedura, tutt'ora in fase di sviluppo, per compensare le acquisizioni dal rumore di fondo. Tale procedura è necessaria perché, sebbene la camera anecoica sia sufficientemente isolata alle basse frequenze, tale accorgimento non è sufficiente (< 100 Hz) ed una dose di rumore riesce comunque a transitare all'interno. In questa banda di frequenze occorrono le prime armoniche di emissione del motore ad un livello di pressione sonora molto basso (< 20 dB) sicuramente inferiore al livello del rumore di fondo.

Elaborazione dati

Dopo la fase di acquisizione dei segnali, che ha impiegato gran parte del periodo di tirocinio, ha avuto inizio la fase di analisi dei segnali.

Il primo descrittore analizzato è stato il livello di pressione sonora in bande di terzi di ottave. Tale descrittore si è rivelato subito insufficiente per classificare i diversi motori in quanto tutti i segnali analizzati presentavano livelli di pressione sonora pressoché uguali.

Una dettagliata analisi ha rivelato che il rumore emesso da tali motore, sebbene periodico, contiene modulazioni in ampiezza e in frequenza.

Risulta quindi necessario disporre di ulteriori descrittori oggettivi che consentano una più agevole interpretazione dei dati acustici acquisiti.

Per analizzare nel dettaglio queste fluttuazioni è stata implementata una procedura in ambiente Matlab che valuta le traslazioni in frequenza e le variazioni in ampiezza per tutte le armoniche che compongono il segnale. 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.

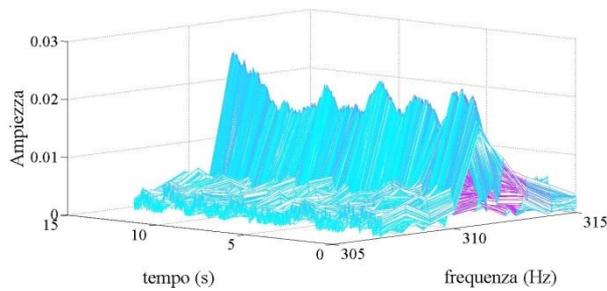


Figura 5 : Modulazione ampiezza

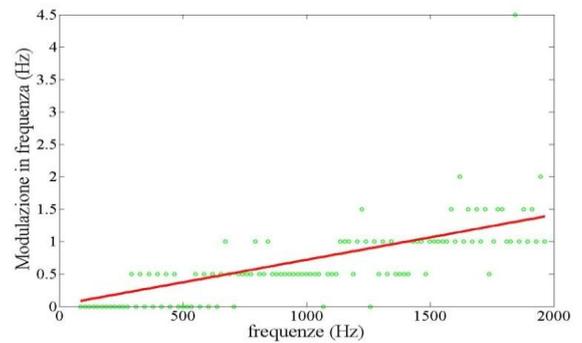


Figura 6 : Modulazione in frequenza

Successivamente si è passati allo studio delle caratteristiche soggettive di un suono utilizzando tutti quei parametri psicoacustici come la loudness, la sharpness, la fluctuation, la roughness presenti in letteratura.

Al fine di spiegare l'impatto di tutti questi attributi è stata valutata la "Psychoacoustic Annoyance", che lega tutti questi parametri secondo una semplice relazione empirica.

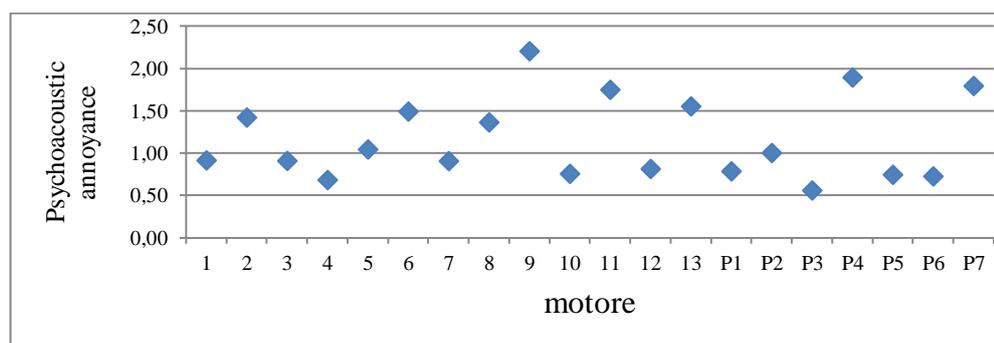


Figura 7 : Psychoacoustic Annoyance di motori idonei (1-13) e non idonei (P1-P7)

Inoltre, ascoltando i diversi motori, è possibile riscontrare una diversa tonalità di emissione, componente, che senz'altro influisce sul giudizio complessivo del suono in esame. Mediante una complessa procedura, sviluppata sempre in ambiente Matlab, che chiama in causa aspetti, quali: il mascheramento e il diverso comportamento dell'orecchio in funzione della frequenza, è stata ricavata la sensazione di tonalità nota come "virtual pitch" per tutti i motori in esame. Una tabella di queste frequenze è di seguito riportata:

Tabella 1 : Virtual pitch

Motore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Virtual Pitch (Hz)	340	399	258	262	478	244	253	257	393	355	244	252	254

Motore	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Virtual Pitch (Hz)	501	286	415	512	387	291	292

Conclusioni

In questo lavoro è stata analizzata la rumorosità emessa da motori elettrici a corrente continua, che vengono utilizzati come modulo elettro-ventilatore nell'impianto di condizionamento di alcune autovetture già presenti sul mercato.

Si è cercato di capire, mediante un'analisi oggettiva, quali sono le caratteristiche di emissione sonora di motori classificati idonei e quelli scartati in fase di produzione cioè non idonei. Le applicazioni di questo studio sono molteplici. In primo luogo è possibile automatizzare la fase di selezione dei motori direttamente sulla linea di produzione semplicemente mediante una misura di pressione sonora. Inoltre è possibile capire, per contribuire al miglioramento della qualità del prodotto, quali sono gli attributi che definiscono un'emissione sonora: suono gradevole o "rumore".

Un primo risultato perseguito è stato la caratterizzazione in frequenza del segnale emesso dai motori. In particolar modo, mediante un'analisi spettrale nel tempo, si è appurato che lo spettro è armonico e le componenti sono modulate in fase ed in ampiezza. Questo aspetto influisce senz'altro sulla rumorosità percepita. Confrontando il rumore in esame con un segnale ricostruito virtualmente, che possiede le stesse componenti armoniche in frequenza ma non modulate, quest'ultimo appare molto più "battente". Ad oggi questa caratteristica è indice di un difetto, mentre è stato riscontrato che tale

sensazione di battimento non è legata ad un malfunzionamento ma semplicemente alla frequenza fondamentale, funzione della velocità di rotazione. Nel segnale reale la sensazione di battimento non è così percepibile perché viene attenuata dal fenomeno di modulazione.

Seguendo i dettami della letteratura di settore e delle norme tecniche è stato possibile attribuire ad alcuni aspetti soggettivi della rumorosità, quali: intensità, asprezza e tonalità, dei descrittori oggettivi, facilmente misurabili come la loudness, la roughness e la virtual pitch. Applicando le procedure per il loro calcolo sono emerse non poche difficoltà. Infatti alcuni aspetti, che ad orecchio erano immediatamente percepibili, non erano più riscontrabili in tali descrittori. Per tale motivo sono stati proposti alcuni accorgimenti originali.

È stata quindi stilata una classifica, di motori idonei e motori non idonei, che non coincide con quella decisa dall'azienda tutt'ora valutata soggettivamente.

Secondo il parere dello scrivente la procedura proposta, sebbene ancora in fase di perfezionamento, si presta molto allo scopo in quanto riesce a dare un giudizio complessivo che tiene conto di tutte le caratteristiche psicoacustiche percepibili.