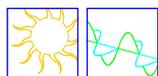
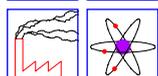


Realizzazione di sistemi di controllo attivo del rumore allo scarico di motori a 4 tempi



Collana Tecnico-Scientifica
diretta da Giorgio Galli



Quaderno n. 16

FRANCESCO ASDRUBALI, CINZIA TOSTI, GIORGIO BALDINELLI

**REALIZZAZIONE DI DISPOSITIVI DI
CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE ALLO
SCARICO DI MOTORI A COMBUSTIONE
INTERNA A QUATTRO TEMPI**

Luglio 2001



Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici

INDICE

Autori	pag. 5
Riassunto	pag. 7
Abstract	pag. 8
Introduzione	pag. 9
1. Progetto e realizzazione di una marmitta elettronica per motori a quattro tempi.....	pag. 11
1.1 Richiami sul motore a 4 tempi.....	pag. 11
1.2 Sistemi di scarico dei motori a combustione interna	pag. 16
1.3 Propagazione acustica nel condotto di scarico.....	pag. 18
1.4 Caratteristiche del rumore prodotto dal condotto di scarico di un'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD	pag. 21
1.5 Progetto della marmitta elettronica	pag. 24
1.6 Caratteristiche meccaniche	pag. 26
1.7 Caratteristiche acustiche.....	pag. 28
2. Prestazioni fluidodinamiche della marmitta elettronica.....	pag. 39
2.1 Perdite di inserzione e rendimento del motore.....	pag. 39
2.2 Misure di pressione	pag. 45
2.3 Prova su strada.....	pag. 56
2.4 Prova da fermo	pag. 58

2.5	Commenti ai risultati delle prove di consumi.....	pag. 60
3.	Sviluppo di algoritmi di controllo per il rumore prodotto dal motore a quattro tempi	pag. 63
3.1	Teoria e strutture per il controllo attivo del rumore.....	pag. 63
3.2	L'unità di controllo.....	pag. 66
3.3	Algoritmo di controllo: "Filtered-X LMS"	pag. 73
3.3.1	Sistema di sviluppo	pag. 78
3.4	Listato del programma: algoritmo FxLMS	pag. 79
4.	Verifiche sperimentali sul prototipo di marmitta elettronica per motore a quattro tempi ed ottimizzazioni.....	pag. 87
4.1	Verifiche sperimentali	pag. 87
4.2	Strumentazione fonometrica.....	pag. 88
4.3	Modalità di misura	pag. 89
4.4	Prima serie di misure	pag. 91
4.5	Commenti ai risultati della prima serie di misure.....	pag. 107
4.6	Seconda serie di misure.....	pag. 108
4.7	Commenti ai risultati della seconda serie di misure.....	pag. 123
	Conclusioni	pag. 125
	Elenco dei simboli.....	pag. 129
	Riferimenti bibliografici.....	pag. 137

Autori

Francesco Asdrubali

Nato a Perugia nel 1967, laureato in Ingegneria Civile nel 1990, è ricercatore confermato di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria di Perugia e docente di Energetica dall'a.a. 1999/2000. Membro del Consiglio Scientifico del CIRIAF, è autore di circa 40 pubblicazioni nei settori della climatizzazione, dell'energetica, dell'acustica, dell'illuminotecnica e delle proprietà termofisiche dei fluidi.

Cinzia Tosti

Nata a Firenze nel 1969, si è laureata in Ingegneria Elettronica nel 2000. è Titolare di Borsa di Studio annuale in "Controllo Attivo del Rumore" presso l'Università degli Studi di Perugia e collabora con il CIRIAF dal 2000. Dall'a.a. 2000/2001 svolge esercitazioni al Corso di Acustica Applicata della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia.

Giorgio Baldinelli

Nato a Perugia nel 1971, si è laureato in Ingegneria Meccanica nel 1996 ed è titolare di un assegno di ricerca presso l'Università degli Studi di Perugia dal 1999. E' autore di 3 pubblicazioni nel campo della termofisica e dell'acustica.

Riassunto

Il presente lavoro illustra il progetto e la realizzazione di un sistema di controllo attivo del rumore applicato allo scarico di motori a combustione interna a quattro tempi.

Per raggiungere tale obiettivo è stato necessario sviluppare specifici modelli per descrivere il campo acustico e la propagazione del rumore nei condotti di scarico dei motori a combustione interna a quattro tempi. La progettazione e la realizzazione del sistema di controllo è stata effettuata facendo riferimento al rumore prodotto da un'autovettura FIAT Marea 1900 JTD. Sono stati sviluppati originali algoritmi di controllo di tipo adattivo specifici per il rumore prodotto da motori a quattro tempi funzionanti a regime variabile.

La messa a punto e le verifiche sperimentali sul prototipo di marmitta elettronica sono state effettuate direttamente sull'autoveicolo suddetto: si è constatato che l'impiego delle tecniche di controllo attivo del rumore allo scarico del veicolo consente di ottenere attenuazioni significative, in media 16 dB sulle componenti principali.

Inoltre, sono state effettuate delle misure di pressione per valutare le perdite di carico prodotte all'interno dei condotti di scarico della marmitta elettronica e di quella tradizionale in dotazione e sono state eseguite delle prove di consumi su strada e da fermo; si è osservato che con la marmitta elettronica si ottiene un miglioramento delle prestazioni di circa il 2%

Abstract

This research illustrates the design and realization of an active noise control system applied to the exhaust pipe of four times internal combustion engines.

In order to obtain such objective it has been necessary to develop specific models to describe the acoustic field and noise propagation in the exhaust muffler of four times internal combustion engines. The control system design has been carried out for the noise produced from a car (FIAT Marea 1900 JTD).

Original adaptive control algorithms for four times internal combustion engines have been developed.

The experimental tests on the electronic prototype has been carried out directly on the car: it has been observed that the use of the active noise control techniques to the exhaust pipe of the car has concurred to obtain high attenuation, 16 dB average, on the main components.

Moreover, pressure measures, in order to estimate the insertion loss produced by electronic and traditional muffler in equipment, have been carried out and consumption tests have been executed with the car in movement and with the car arrested: an performance improvement, approximately 2%, has been obtained with electronic muffler.

Introduzione

I principi che regolano le tecniche tradizionali per l'abbattimento del rumore possono essere così riassunti: assorbimento delle oscillazioni di pressione, dissipazione per mezzo di elementi reattivi; interferenza distruttiva. Esse possono essere definite passive poiché non comportano alcuna nuova introduzione di energia.

I vantaggi offerti dalla tecnica del controllo attivo del rumore (basata sulla generazione di una perturbazione in controfase rispetto a quella da cancellare) nel silenziamento del rumore gasdinamico sono molteplici e vanno dalla possibilità di realizzare sistemi di abbattimento con perdite di carico molto basse, a quelle di poter controllare con maggiore efficacia le componenti del rumore a bassa frequenza, per le quali i sistemi tradizionali mostrano prestazioni ridotte.

Per la progettazione e la realizzazione del sistema di controllo denominato "marmitta elettronica" specifico per il rumore allo scarico di motori a combustione interna a quattro tempi, si è fatto riferimento ad un motore di un'autovettura FIAT MAREA SW 1900 JTD.

1. Progetto e realizzazione di una marmitta elettronica per motori a quattro tempi

1.1 Richiami sul motore a 4 tempi

Il progetto del sistema di controllo è stato realizzato su un motore a quattro tempi di un'autovettura FIAT MAREA SW 1900 JTD. Essa è dotata di un motore diesel, così chiamato in onore del suo ideatore Rudolf Christian Karl Diesel.

Nella versione a quattro tempi il processo operativo si svolge sempre in quattro corse dello stantuffo (due giri di manovella) e le quattro fasi corrispondenti si chiamano di aspirazione, di compressione, di espansione e di scarico.

Il diagramma pressione – volume del fluido è mostrato in figura 1: sono qui illustrate le fasi che segue il fluido nelle quattro corse anzidette, a muovere dalla posizione di punto morto superiore (p.m.s.). Per comodità di interpretazione il cilindro è rappresentato in posizione orizzontale, al fine di rendere chiara la corrispondenza dei volumi occupati dal fluido nel diagramma che ne mostra l'andamento della pressione. Per semplicità, si ipotizza che siano nulle le perdite di carico (sia localizzate presso i seggi delle valvole I ed S, sia distribuite nei relativi condotti di introduzione e di scarico del fluido) e che l'apparato di distribuzione apra istantaneamente le valvole esattamente in corrispondenza dei punti morti.

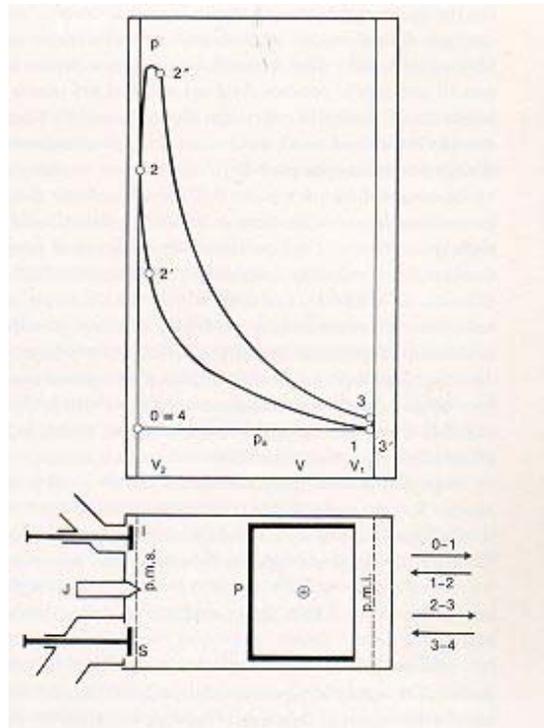


Fig. 1: *diagramma di funzionamento di un motore diesel*

La fase di aspirazione 0-1, a differenza di quanto avviene nel motore ad accensione comandata, si compie con aria (e non con miscela aria combustibile) la quale viene aspirata dall'esterno, attraverso il condotto di introduzione, durante la corsa discendente dello stantuffo. Ad essa segue la fase di compressione, che ha luogo durante la successiva corsa ascendente 1-2.

Nel motore in argomento la compressione dell'aria è più spinta di quanto non sia quella della miscela nel motore ad accensione comandata e

perciò il rapporto di compressione $\rho = V_1 / V_2$ è più elevato.

Al termine della fase un iniettore J introduce nel cilindro un'adatta quantità di combustibile nebulizzato, che si accende spontaneamente, appunto in virtù della pressione e della temperatura dell'ambiente comburente nel quale esso viene a trovarsi. In realtà l'accensione spontanea del combustibile osserva certi limiti inferiori per quanto riguarda la temperatura e la pressione dell'ambiente (da cui la necessità, per il motore diesel, di un alto rapporto di compressione), ma, anche in condizioni adatte, essa richiede comunque un certo tempo, sebbene brevissimo, per prodursi. Ne consegue l'opportunità di iniettare il combustibile nel cilindro nel punto 2' e cioè qualche istante prima che lo stantuffo raggiunga il p.m.s., onde ottenere l'accensione spontanea quando il fluido si trova nella camera di compressione, la quale ha il minimo volume possibile V_2 .

La combustione, a seguito dell'autoaccensione che interessa contemporaneamente tutte le particelle del combustibile presenti nella camera (una prima parte della quantità totale del combustibile destinato al processo) è rapidissima e ciò comporta un violento innalzamento della pressione e della temperatura nel cilindro. L'iniezione, tuttavia, impegna un tempo ben superiore a quello di ritardo all'accensione e perciò la combustione procede, nella misura in cui il combustibile continua a penetrare nella camera, anche nel primo tratto di espansione. La pressione prima aumenta ancora e poi inizia a diminuire (per effetto del progressivo aumento del volume), finché, dopo il punto 2'', che segna la quasi estinzione della

combustione, essa si riduce progressivamente per effetto dell'espansione del fluido.

Dopo il punto 3 si succedono le fasi 3-3' di scarico spontaneo e 3'-4 di scarico forzato. La fase di scarico spontaneo 3-3', nell'ipotesi di perdite di carico nulle, si effettua in corrispondenza del p.m.i. (punto morto inferiore) ed il fluido contenuto nel cilindro acquista così la pressione esterna.

La corsa ascendente 3'-4 dello stantuffo è dedicata alla fase di scarico forzato, detta anche di espulsione. Lo stantuffo, spostandosi, spinge davanti a sé i prodotti della combustione (la valvola S rimane sempre aperta) mantenendo nel cilindro la necessaria sovrappressione rispetto all'esterno.

Il punto 4 del diagramma coincide con il punto 0 ed infatti la posizione degli organi è tale da consentire l'identico rinnovo del processo.

Delle quattro fasi illustrate una sola è attiva, nel senso che produce lavoro: la fase di espansione; le altre sono passive. La fase di compressione infatti assorbe lavoro per comprimere il fluido e quelle di aspirazione e di scarico (fasi di pompaggio), destinate al trasferimento del fluido, sono anergiche nell'ipotesi semplificativa di perdite di carico nulle, ma, in realtà, assorbono lavoro essendo sempre presente una differenza di pressione tra il fluido e l'esterno durante il loro corso.

La descrizione che è stata data del funzionamento del motore diesel a quattro tempi è aderente alla realtà tranne che sotto due aspetti connessi con le ipotesi semplificative prima imposte: quella di perdite di carico nulle nei condotti e quella di manovra istantanea delle valvole ai punti

morti.

La rimozione della prima ipotesi rende curvi, anziché rettilinei, i tratti 0-1 e 3'-4 delle fasi di pompaggio, i quali si sviluppano nella realtà a pressioni variabili e rispettivamente in media inferiori e superiori a quella esterna.

La rimozione della seconda ipotesi, dovuta ai tempi non nulli necessari ad aprire e chiudere le valvole, comporta l'arrotondamento delle angolosità che si vedono nel diagramma di figura 1.

La figura 2 mostra lo spaccato di un motore diesel quattro tempi.

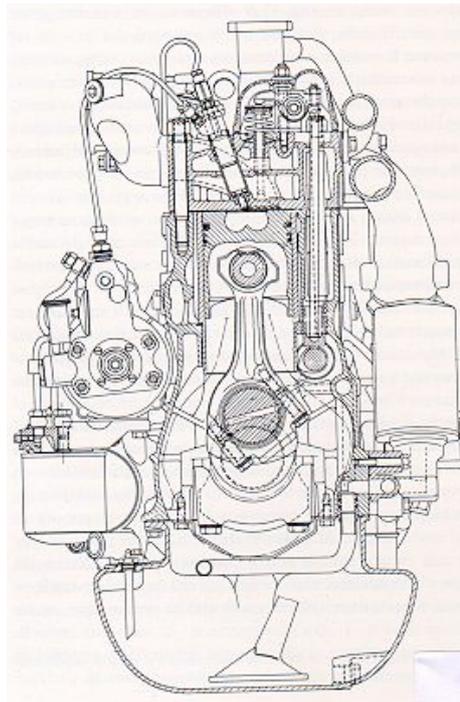


Fig. 2: *sezione di un motore diesel quattro tempi*

1.2 Sistemi di scarico dei motori a combustione interna

La marmitta di scarico è il nome comunemente dato al serbatoio di raccolta ed espulsione dei gas combusti, prodotti da un motore alternativo a combustione interna.

L'inserzione nel tubo di scarico di una marmitta ha essenzialmente lo scopo di attenuare il rumore prodotto dal fenomeno di espulsione dei gas.

La marmitta può soddisfare al suo compito di silenziatore facendo uscire i gas ad un'appropriata velocità, compatibilmente con la necessità di limitare la contropressione allo scarico del motore, che sarebbe causa di perdita di potenza.

La marmitta è costruita in modo da smorzare il maggior numero di armoniche, applicando tre principi fisici:

- *Attrito*. Si provoca una dissipazione di energia imponendo che il moto delle particelle d'aria nello strato limite, associato all'oscillazione di pressione, avvenga con elevato smorzamento viscoso; questo effetto viene "amplificato" rendendo massima l'estensione dello strato limite dei gas di scarico, e quindi aumentando la superficie di separazione dei gas con l'ambiente che lo circonda.
- *Interferenza di onde acustiche*. Si ottiene attenuazione dell'intensità dell'onda inducendo uno sfasamento tra due onde della stessa frequenza ed originariamente in fase, per esempio facendo percorrere diverse lunghezze a porzioni diverse di flusso. Se la diversità di lun-

ghezza è pari ad un numero intero di mezze lunghezze d'onda, lo sfasamento è di 180° e l'onda che si riforma a valle ha un'ampiezza nulla. Questo sistema richiede però delle lunghezze di condotto proibitive per eliminare il rumore a bassa frequenza. Inoltre, essendo la forma d'onda di pressione allo scarico ricca di armoniche superiori alla fondamentale, basta che una di queste coincida con la frequenza propria di una parete della marmitta, per incrementare le emissioni per opportune velocità angolari del motore.

- *Riflessione di onde acustiche.* Tramite riflessione dell'energia acustica che si propaga nel condotto di scarico, si attenua il rumore emesso all'esterno; questa riflessione si manifesta in corrispondenza delle discontinuità del condotto costituite da brusche variazioni di sezione: infatti, in presenza di discontinuità aventi un'impedenza acustica molto diversa da quella del condotto, solo una piccola parte di energia acustica non viene riflessa. L'energia acustica riflessa è successivamente dissipata in calore. Applicando il principio appena descritto, è possibile realizzare marmitte che, dal punto di vista acustico, si comportano da filtri passa-basso eliminando le armoniche superiori alla frequenza di taglio (coincidente con quella del risonatore di Helmholtz).

Di seguito si elencano i principali tipi di marmitta suddivisi per principio di funzionamento:

- Filtri acustici, tipo serie, parallelo e ad assorbimento.
- Marmitte a più camere, con tubetti di connessione.

- Silenziatori a collettore, toroidali, a tubi perforati.
- Marmitte composite.

Gli effetti dell'applicazione della marmitta di scarico al motore possono essere così riassunti: le percentuali di perdita di potenza massima oscillano dal 5 al 15%, l'aumento della contropressione di scarico varia da 10kPa in motori monocilindrici a due tempi fino a valori di 50kPa in motori a più cilindri; l'aumento di consumo specifico di carburante è dell'ordine del 10%, l'aumento di temperatura massima del motore è dell'ordine di 50°C, mentre la riduzione del livello di rumore è di circa 30dB.

Rispetto alle marmitte convenzionali, la marmitta elettronica non presenta cavità risonanti, camere e tratti di tubo che ostacolano la propagazione dell'energia acustica. Essa è infatti costituita da un tubo vuoto e liscio che, oltre ai vantaggi di tipo acustico, garantisce incrementi delle prestazioni del motore poiché introduce minori perdite di carico riducendo il lavoro del ciclo di lavaggio. L'impiego della marmitta elettronica consente inoltre una forte riduzione degli oneri tecnici ed economici relativi alla manutenzione che, al contrario, sono rilevanti nelle marmitte tradizionali.

1.3 Propagazione acustica nel condotto di scarico

Nel caso dell'autovettura in esame, il condotto di scarico, nella sua parte terminale, dove viene installata la marmitta elettronica, è costituito

da un tubo vuoto, a sezione circolare costante di diametro 6 cm, lunghezza 125 cm. Il tubo suddetto presenta due curve entrambe di diametro 6 cm e lunghezza rispettivamente pari a 8 e 10 cm.

In figura 3 è riportato il circuito elettrico equivalente della parte finale del condotto di scarico nel quale al tubo vuoto corrisponde un'induttanza di valore:

$$L = \frac{\rho \cdot l}{S} = 571.26 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \quad (1)$$

dove l è la lunghezza del condotto finale ed S l'area della sezione.

Inoltre il tubo presenta due curve, perciò si sostituisce ad l la lunghezza equivalente $(l + 2 \cdot 0.8 \cdot D)$, dove D è il diametro della sezione del tubo.

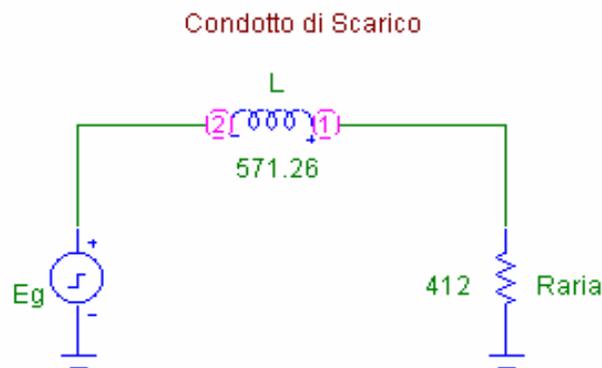


Fig. 3: circuito equivalente del condotto di scarico

Il circuito equivalente si chiude sulla resistenza “Raria”, corrispondente all’impedenza acustica dovuta all’aria presente all’uscita del condotto di scarico.

Poiché lo scoppio all’interno del cilindro può essere approssimato ad un segnale impulsivo, è opportuno valutare la risposta all’impulso del circuito equivalente.

Nelle figure 4 e 5 si riportano rispettivamente la risposta impulsiva e la funzione di trasferimento del circuito proposto, dalle quali si evince che il comportamento del condotto di scarico è di tipo passa-basso.

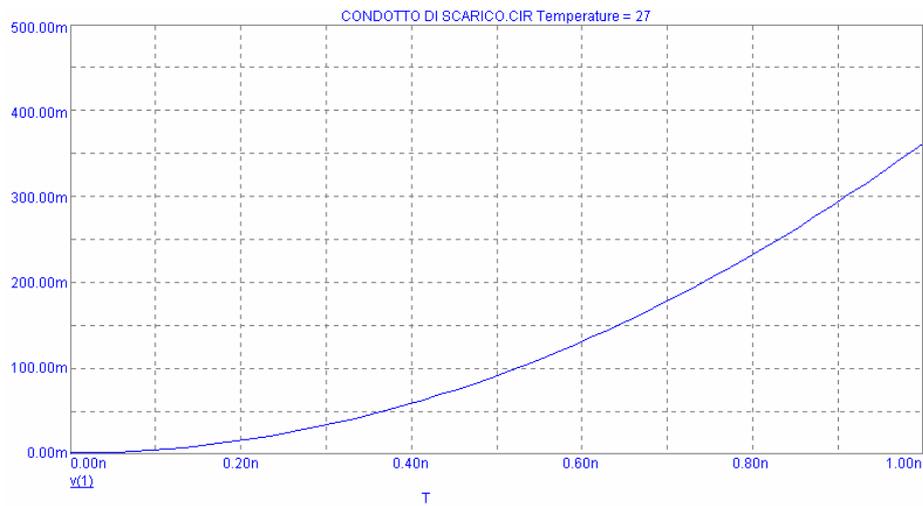


Fig. 4: risposta impulsiva del circuito equivalente del condotto di scarico

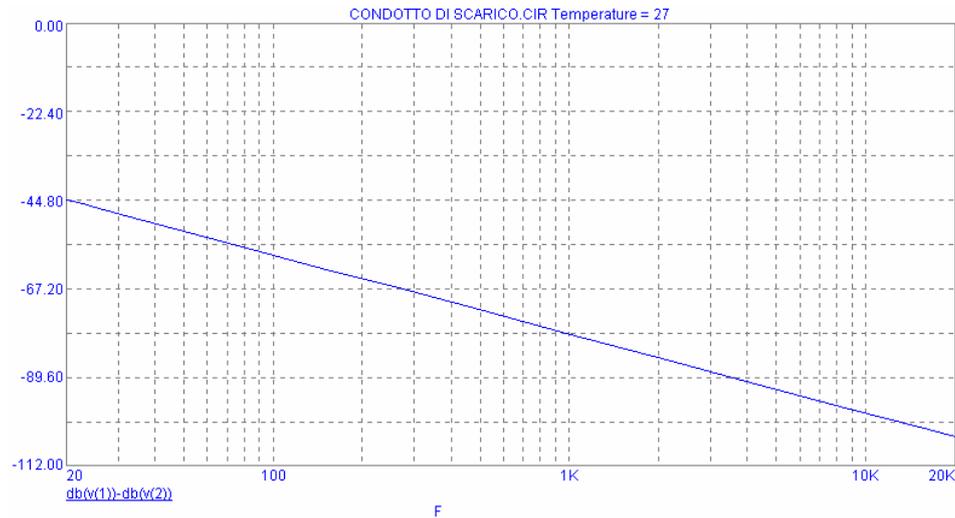


Fig. 5: funzione di trasferimento del circuito equivalente del condotto di scarico

1.4 Caratteristiche del rumore prodotto dal condotto di scarico di un'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD

E' stata condotta una campagna di misure in ambiente aperto finalizzata alla caratterizzazione del rumore emesso dal condotto di scarico (equipaggiato con la marmitta di serie in dotazione al mezzo) dell'autovettura in esame, in corrispondenza di un regime di rotazione del motore pari a 2500 giri.

I rilevamenti dell'emissione rumorosa sono stati condotti seguendo la normativa ISO 5130 del 1982 specifica per il rumore emesso da autoveicoli in stazionamento. In particolare, tale normativa prescrive che le misure siano condotte in campo libero, in condizioni climatiche non avverse e velocità del vento non superiore ai 5 m/s. Il suolo deve essere

compatto affinché abbia elevato potere riflettente. Il microfono deve essere posto alla distanza di 0.5 m dalla terminazione del tubo di scarico formando con esso un angolo di 45° ad un'altezza dal suolo di almeno 0.2 m.

In figura 6 è riportato l'andamento in bande di 1/3 d'ottava dello spettro del livello equivalente continuo di pressione sonora (LLeq) misurato.

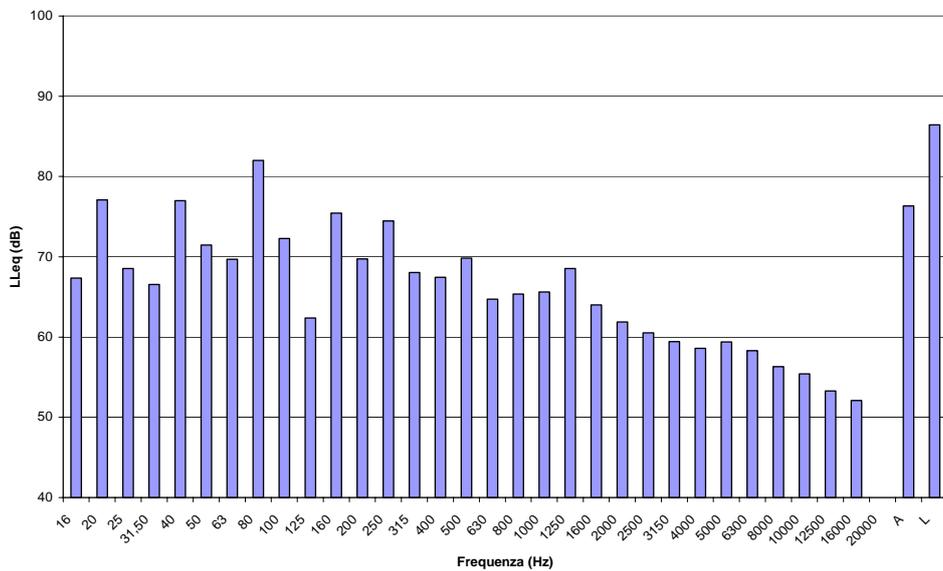


Fig. 6: spettro del LLeq prodotto dal condotto di scarico di un'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD (2500 r.p.m.)

Il livello equivalente di rumore rilevato è 86.4 dB. Si nota la presenza di una frequenza fondamentale pari circa a 80 Hz e di componenti significative alle basse frequenze.

In tabella 1 sono riportati i livelli equivalenti continui di pressione sonora (LLeq) misurati.

Tabella 1: valori del LLeq misurati in prossimità dello scarico di un'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD (2500 r.p.m.)

Frequenza (Hz)	LLeq (dB)
16	67.3
20	77.1
25	68.5
31,50	66.6
40	77.0
50	71.5
63	69.7
80	82.0
100	72.3
125	62.4
160	75.4
200	69.7
250	74.5
315	68.0
400	67.4
500	69.9
630	64.7
800	65.4
1000	65.6
1250	68.5
1600	64.0
2000	61.9
2500	60.5
3150	59.4
4000	58.6
5000	59.4
6300	58.3
8000	56.3
10000	55.4
12500	53.3
16000	52.1
A	76.3
L	86.4

1.5 Progetto della marmitta elettronica

Il funzionamento del prototipo progettato per l'applicazione su motori a quattro tempi si basa sul principio di sovrapposizione degli effetti: viene realizzata un'interferenza distruttiva tra il segnale di rumore, proveniente dal condotto di scarico, ed uno di antirumore generato da un altoparlante che funge da sorgente secondaria o di cancellazione.

L'altoparlante invia il segnale di antirumore all'interno di una camera di accoppiamento di forma parallelepipedica a base triangolare. All'interno di essa si trova il condotto di scarico, isolato acusticamente attraverso materiale fonoassorbente dal segnale di antirumore. Poiché l'interferenza tra i due segnali deve avvenire in corrispondenza dell'uscita del condotto di scarico, la sezione terminale della camera di accoppiamento, nella parte finale, deve essere gradualmente variata in modo da ottenere una sezione terminale a forma circolare (coassiale al condotto di scarico), da cui fuoriesce il segnale di antirumore, come mostrato in figura 7.

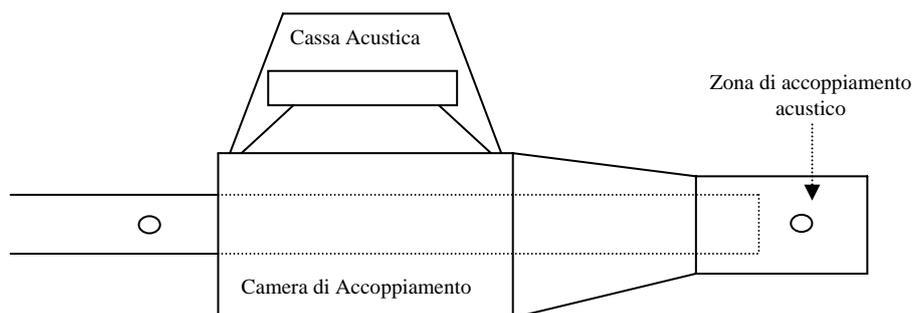


Fig. 7: marmitta elettronica per motore a quattro tempi

L'altoparlante (modello DW84 della Dragster, di potenza nominale 100 W e diametro 20.4 cm) è coperto esternamente da una cassa acustica a forma di tronco di piramide a base quadrata rivestita all'interno da materiale fonoassorbente che, limitando l'emissione delle onde sonore verso l'esterno, consente di migliorare le prestazioni dell'altoparlante stesso. Quest'ultimo è alimentato, tramite un amplificatore, dall'unità di controllo che esegue l'algoritmo di controllo.

Inoltre sono stati praticati due fori, del diametro di 15 mm, per permettere la comunicazione diretta tra l'interno della cassa acustica e la camera di accoppiamento in modo da aumentare l'efficienza dell'altoparlante.

E' stata anche prevista la possibilità di utilizzare altri due altoparlanti per generare il segnale di antirumore; a tale scopo sono stati praticati due fori circolari del diametro di 16 cm, al momento chiusi, in corrispondenza delle altre due facce della camera di accoppiamento.

A monte e a valle della marmitta sono stati inseriti due tubicini di lunghezza 40 mm e diametro 15 mm che consentono l'inserimento di due microfoni: con il microfono a monte della marmitta elettronica viene prelevato il segnale di riferimento, mentre con quello a valle si rileva il segnale di errore; in questo modo si ottiene un segnale di riferimento ben sincronizzato con il rumore da cancellare prodotto dal condotto di scarico dell'autovettura.

Le prove di installazione della marmitta elettronica prevedono che il suo funzionamento venga testato sia collegandola in serie al condotto di

scarico dell'autovettura, sia sostituendo con essa il tratto finale della marmitta di serie, progettato per eliminare passivamente il rumore alle basse frequenze.

1.6 Caratteristiche meccaniche

Per la realizzazione della marmitta, è stata utilizzata una lamiera in acciaio Inox dello spessore di 3 mm, tale da garantire un'adeguata robustezza meccanica ed un elevato isolamento fra il condotto di propagazione e l'esterno.

La forma e le dimensioni del prototipo sono state scelte, oltre che in base a considerazioni di carattere acustico (come per il progetto della cassa dell'altoparlante), anche tenendo conto della temperatura dei gas combusti che, trasmessa per conduzione attraverso le pareti metalliche, una volta giunta nella camera di accoppiamento potrebbe danneggiare la membrana dell'altoparlante. A tale proposito il condotto di scarico, in corrispondenza della camera di accoppiamento, è stato rivestito esternamente con materiale termoisolante (lana di roccia), completata mediante una pellicola di contenimento.

In figura 12 si riporta il disegno quotato della marmitta elettronica, dove sono raffigurate rispettivamente una panoramica dall'alto, una vista dall'uscita ed una laterale.

Le dimensioni della marmitta elettronica progettata sono le seguenti:

- Cassa Acustica: forma a tronco di piramide di altezza 14 cm, basi quadrate di lato 22 cm (base inferiore) e 13.5 cm (base superiore);
- Tubo primario: diametro interno 6 cm;
- Tubo secondario (di antirumore): diametro interno 10 cm;
- Camera di accoppiamento: forma parallelepipedica di altezza 24 cm e basi a forma di triangolo isoscele di base 24 cm e altezza 15.93 cm.

Nelle figure 8 e 9 sono riportate le foto che mostrano, rispettivamente, alcune fasi di montaggio e la realizzazione finale della marmitta elettronica.



Fig. 8: *fasi di montaggio della marmitta elettronica*



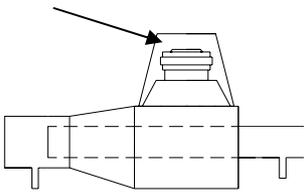
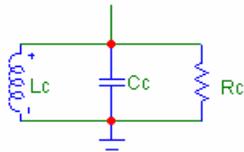
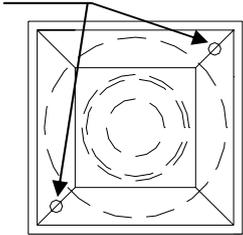
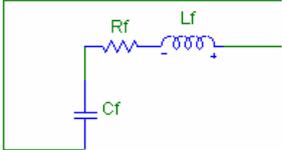
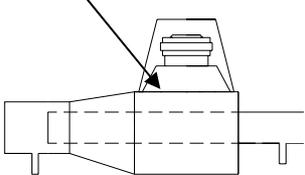
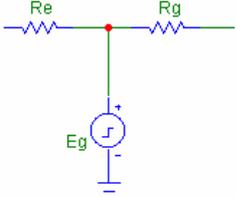
Fig. 9: *realizzazione finale della marmitta elettronica*

1.7 Caratteristiche acustiche

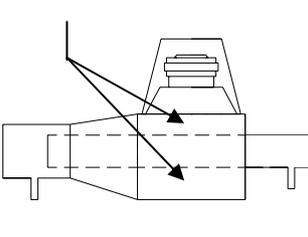
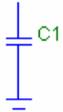
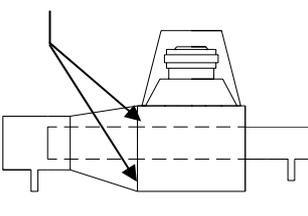
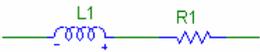
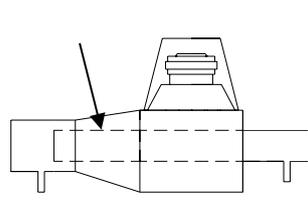
Le caratteristiche acustiche della marmitta elettronica sono state analizzate individuando un circuito elettrico equivalente, in cui ad ogni componente elettrico corrisponde una specifica parte meccanica della marmitta stessa.

L'analogia tra componenti meccanici ed elettrici equivalenti è descritta nella tabella 2. In tale tabella, l'altoparlante, la corrispondente cassa acustica ed i fori che la connettono direttamente alla camera di accoppiamento, si comportano come un circuito risonante RLC parallelo ed un circuito RLC serie.

Tabella 2: corrispondenza tra parti meccaniche della marmitta elettronica e componenti elettrici equivalenti

Tipo di Componente	Componente Meccanico	Componente Elettrico
Cassa Acustica		
Fori di connessione tra l'interno della Cassa acustica e la Camera di Accoppiamento		
Segnale di Antirumore generato dall'altoparlante		

continua

<p>Camera di Accoppiamento</p>		
<p>Uscita Camera di Accoppiamento</p>		
<p>Condotto finale di uscita dell'antirumore</p>		
<p>Resistenza dell'aria</p>		

Il segnale generato dall'altoparlante è riprodotto tramite il generatore di tensione E_g , mentre R_g ed R_e rappresentano rispettivamente la resistenza interna del generatore stesso e la resistenza elettrica della bobina mobile; i valori dei componenti del circuito parallelo RLC sono stati calcolati utilizzando le seguenti formule:

$$C_c = \frac{L_{asm} \cdot S_{Dm}^2}{B_m^2 \cdot l_b^2} = 5.8 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (2)$$

$$L_c = \frac{C_{asm} \cdot B_m^2 \cdot l_b^2}{S_{Dm}^2} = 2.4 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{m^4} \right] \quad (3)$$

$$R_c = \frac{B_m^2 \cdot l_b^2}{S_{Dm}^2 \cdot R_{asm}} = 1.9 \cdot 10^6 \left[\frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (4)$$

dove R_{asm} , C_{asm} e L_{asm} rappresentano rispettivamente resistenza, capacità e induttanza associate alla cassa acustica valutate come segue:

$$C_{asm} = \frac{V_{cas}}{\gamma \cdot P_{cas}} = 2.6 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (5)$$

$$L_{asm} = \frac{\rho \cdot l_{cas}}{S_{cas}} = 5.4 \left[\frac{kg}{m^4} \right] \quad (6)$$

$$R_{asm} = \frac{\mu}{V_{cas}} = 4.7 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (7)$$

S_{Dm} è la superficie del diaframma dell'altoparlante, B_m e l_b sono induzione magnetica e lunghezza del filo conduttore costituente la bobina.

Per valutare i componenti del circuito RLC associato ai fori che connettono l'interno della cassa acustica alla camera di accoppiamento, sono state calcolate induttanza, resistenza e capacità associate ad un singolo foro ed in seguito, tenendo conto che i due fori possono essere considerati in parallelo fra loro, sono stati calcolati i seguenti valori complessivi:

$$\begin{aligned} L_{f1} = L_{f2} &= \frac{\rho}{D_{fm}} = 85.7 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \\ &\Downarrow \\ L_f &= \frac{1}{\frac{1}{L_{f1}} + \frac{1}{L_{f2}}} = 42.8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R_{f1} = R_{f2} &= \frac{\ln \frac{D_{fm}}{h_{fm}}}{4 \cdot S_{fm}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \mu} = 402.8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}} \right] \\ &\Downarrow \\ R_f &= \frac{1}{\frac{1}{R_{f1}} + \frac{1}{R_{f2}}} = 201.4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4 \cdot \text{s}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} C_{f1} = C_{f2} &= \frac{V_{fm}}{\gamma \cdot P_{fm}} = 3.3 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{m}^4 \cdot \text{s}^2}{\text{kg}} \right] \\ &\Downarrow \\ C_f &= C_{f1} + C_{f2} = 6.6 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{m}^4 \cdot \text{s}^2}{\text{kg}} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

dove D_{fm} è il diametro dell'apertura, h_{fm} lo spessore del foro, ω la pulsazione e μ la viscosità dell'aria.

Sfruttando l'analogia tra componenti elettrici e meccanici, sono state valutate le grandezze elettriche rimanenti.

Per quanto concerne la camera di accoppiamento, la cavità interna può essere associata ad una capacità, mentre l'uscita corrisponde ad un'induttanza con una resistenza in serie; i valori determinati sono i seguenti:

$$C1 = \frac{V_{cm}}{\gamma \cdot P_{cm}} = 2.8 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (11)$$

$$L1 = \frac{\rho}{D_{cm}} = 8.7 \left[\frac{kg}{m^4} \right] \quad (12)$$

$$R1 = \frac{\ln \frac{D_{cm}}{h_{cm}}}{4 \cdot S_{cm}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \mu} = 9.5 \left[\frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (13)$$

Il condotto terminale della marmitta elettronica, dove fuoriesce il segnale di antirumore, è schematizzabile con un'induttanza ottenuta come somma di tre termini: il primo tiene conto del tratto di condotto a sezione variabile, il secondo caratterizza la parte finale del condotto a sezione costante, il terzo rappresenta il prolungamento del condotto esterno oltre

quello interno. Il valore di tale induttanza è espresso dalla seguente formula:

$$L2 = \frac{\rho}{\sqrt{M_{1m}}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{S_{2m}}} - \frac{1}{\sqrt{S_{cm}}} \right) + \frac{\rho \cdot l_{2m}}{S_{2m}} + \frac{\rho \cdot l_{3m}}{S_{3m}} = 38.7 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \quad (14)$$

Infine, il circuito equivalente, rappresentato in figura 10, si chiude sulla resistenza di carico dell'aria, corrispondente a circa 412 Ω .

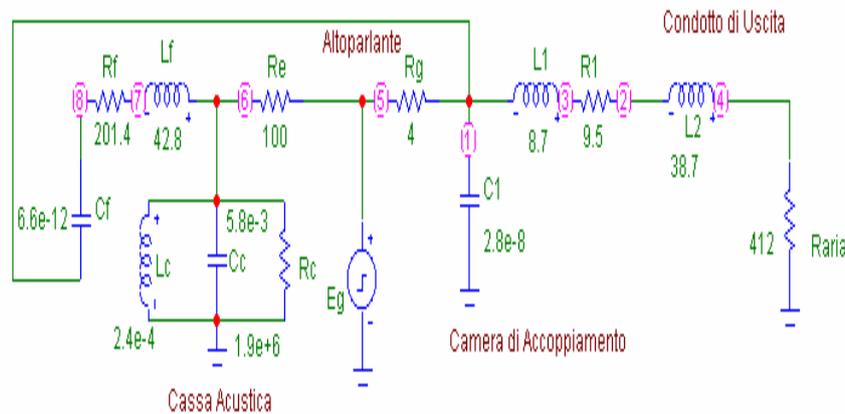


Fig. 10: circuito equivalente della marmitta elettronica

Nella tabella 3 sono riassunti i valori dei componenti elettrici presenti nel circuito equivalente e quelli delle grandezze utilizzate per ricavarli.

Tabella 3: valori dei componenti elettrici presenti nel circuito equivalente e delle grandezze utilizzate per ricavarli

Tipo di Componente	Valori delle Grandezze Meccaniche Utilizzate	Valori dei Componenti Elettrici del circuito equivalente
Cassa Acustica	$V_{cas} = 0.036 \text{ m}^3$ $S_{cas} = 0.031 \text{ m}^2$ $S_{Dm} = 0.033 \text{ m}^2$ $l_{cas} = 0.140 \text{ m}$	$C_c = 5.8 \cdot 10^{-3} \text{ F}$ $L_c = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ H}$ $R_c = 1.9 \cdot 10^6 \Omega$
Fori di connessione tra l'interno della Cassa acustica e la Camera di accoppiamento	$D_{fm} = 0.014 \text{ m}$ $h_{fm} = 0.003 \text{ m}$ $S_{fm} = 1.54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ $V_{fm} = 4.61 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$	$C_f = 6.6 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ $L_f = 42.8 \text{ H}$ $R_f = 201.4 \Omega$
Segnale di Antirumore generato dall'altoparlante		$R_g = 4 \Omega$ $R_e = 100 \Omega$
Camera di Accoppiamento	$V_{cm} = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$C1 = 2.8 \cdot 10^{-8} \text{ F}$
Uscita Camera di Accoppiamento	$D_{cm} = 0.138 \text{ m}$ $h_{cm} = 0.003 \text{ m}$ $S_{cm} = 0.016 \text{ m}^2$	$L1 = 8.7 \text{ H}$ $R1 = 9.5 \Omega$

continua

Condotto finale di uscita dell'antirumore	$M_{1m} = 0.430$ $S_{2m} = 0.005 \text{ m}^2$ $S_{cm} = 0.016 \text{ m}^2$ $S_{3m} = 0.007 \text{ m}^2$ $l_{2m} = 0.05 \text{ m}$ $l_{3m} = 0.010 \text{ m}$	$L2 = 23.4 \text{ H}$
Resistenza dell'aria		$R_{aria} = 412 \Omega$

Il comportamento del circuito elettrico equivalente di figura 10 è stato analizzato utilizzando il software di analisi Micro-Cap 6.0. In figura 11 è riportata la funzione di trasferimento ottenuta che, all'interno della banda acustica, presenta un comportamento di tipo passa basso.

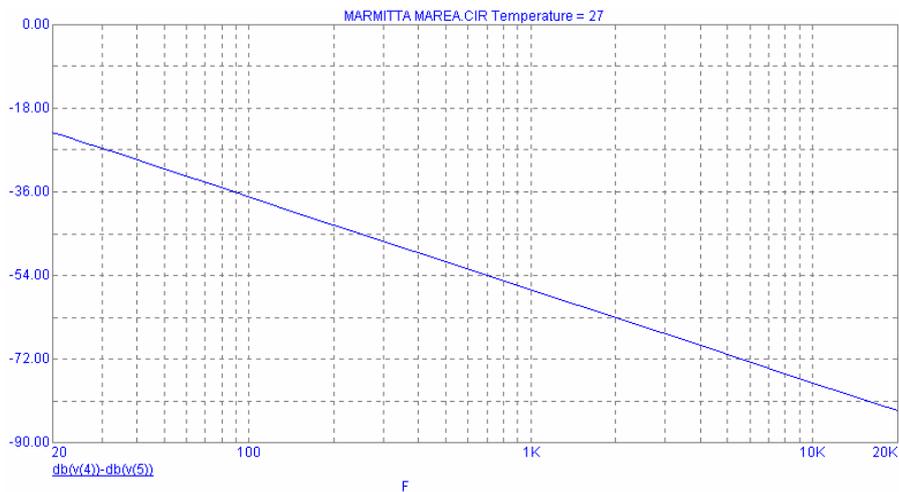


Fig. 11: funzione di trasferimento del circuito equivalente della marmitta elettronica

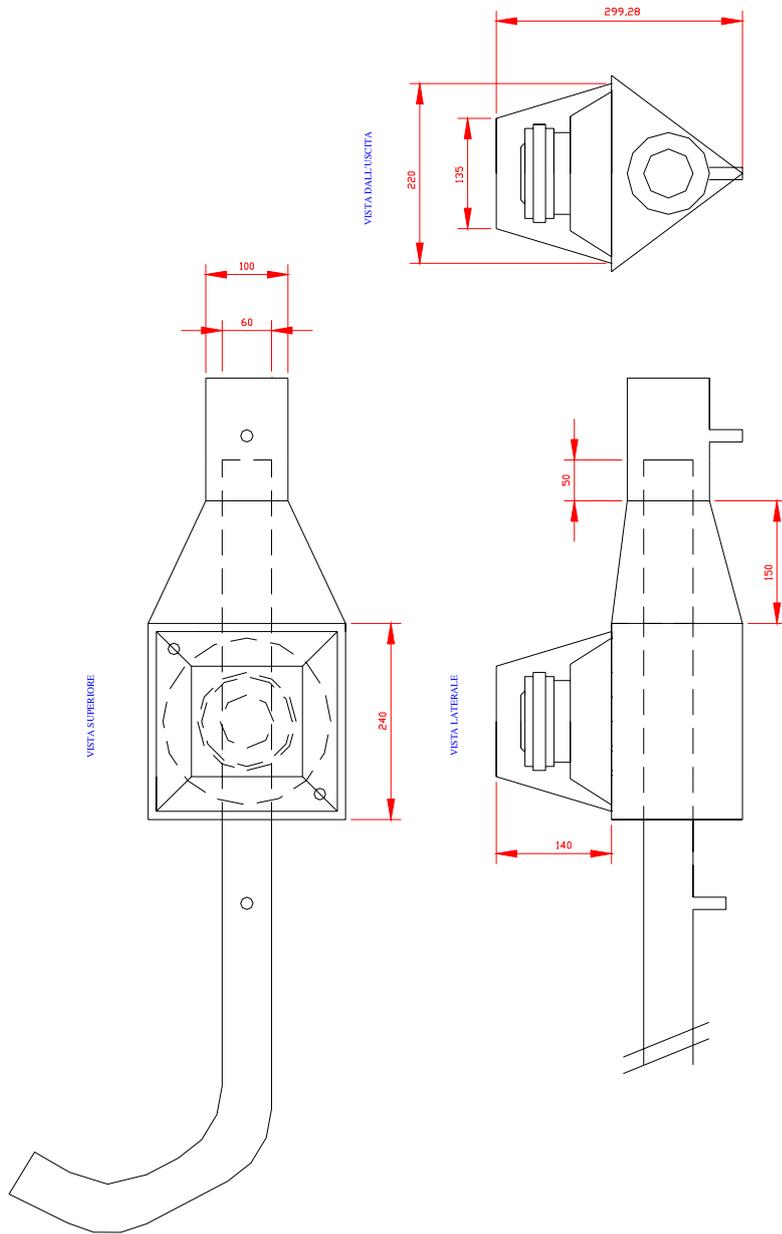


Fig. 12. MARMITTA ELETTRONICA - disegno meccanico

2. Prestazioni fluidodinamiche della marmitta elettronica

2.1 Perdite di inserzione e rendimento del motore

Quando un silenziatore viene inserito in un sistema, agisce su di esso modificandone le caratteristiche; il parametro che fornisce una misura completa dell'effetto di inserimento di un silenziatore è l'Insertion Loss. Esso è definito come la differenza in dB tra i livelli di pressione sonora, misurati in un punto dello spazio (a distanza fissa L) prima e dopo l'inserimento del silenziatore:

$$IL = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{e0}^2}{P_{eS}^2} \right) \quad (15)$$

IL risulta difficile da calcolare perché richiede la conoscenza del diverso modo di reagire della sorgente al variare delle caratteristiche del sistema; è però facile da rilevare sperimentalmente, mediante una comune campagna fonometrica.

Per valutare le perdite di carico, è utile capire come avviene l'introduzione dell'aria e del combustibile nel motore a quattro tempi. Con il termine distribuzione si indica l'operazione e gli apparati che provvedono al ricambio periodico del fluido che lavora nella macchina stessa. Nel caso particolare dei motori a combustione interna la distribuzione provvede, con la dovuta velocità, all'alimentazione dell'aria combu-

rente ed alla evacuazione dei gas combusti.

Nel caso di motori a quattro tempi la distribuzione è sempre comandata mediante appositi otturatori che intercettano periodicamente luci di ammissione e scarico dal cilindro in corrispondenza a ben precise posizioni angolari dell'albero motore al quale sono cinematicamente connessi.

Gli istanti teorici (caso ideale) di apertura e chiusura dei condotti di aspirazione e scarico sono: per l'aspirazione: apertura del punto morto superiore (p.m.s.), corrispondente al termine della fase di espulsione, e chiusura al punto morto inferiore (p.m.i.) successivo; per lo scarico: apertura al p.m.i. corrispondente al termine della fase di espansione dei gas combusti e chiusura al p.m.s. successivo.

Tuttavia, nella realtà, a causa dell'inerzia e delle perdite di carico che accompagnano il moto del fluido motore, si posticipa la chiusura e si anticipa l'apertura dei condotti rispetto ai punti morti sopra citati, delle quantità visibili in figura 13.

Il ritardo alla chiusura del condotto di aspirazione consente di ottenere coefficienti di riempimento più elevati; l'anticipo di apertura del condotto di scarico consente di ridurre la pressione all'interno del cilindro durante l'inizio della corsa di espulsione. Il ritardo alla chiusura della valvola di scarico e l'anticipo all'apertura di quella di aspirazione (il cosiddetto incrocio delle fasi) consente di minimizzare l'aliquota di gas residui nello spazio morto, attraverso un lavaggio dello stesso ottenuto per effetto dei fenomeni dinamici nei condotti di aspirazione e scarico nell'intorno del punto morto superiore; questo lavaggio reso possibile dall'apertura dei

condotti, è particolarmente perseguito nei motori ad accensione per compressione, nei quali il combustibile non accompagna l'aria aspirata durante la fase di aspirazione poiché, altrimenti, parte del combustibile passerebbe facilmente allo scarico con riduzione del rendimento.

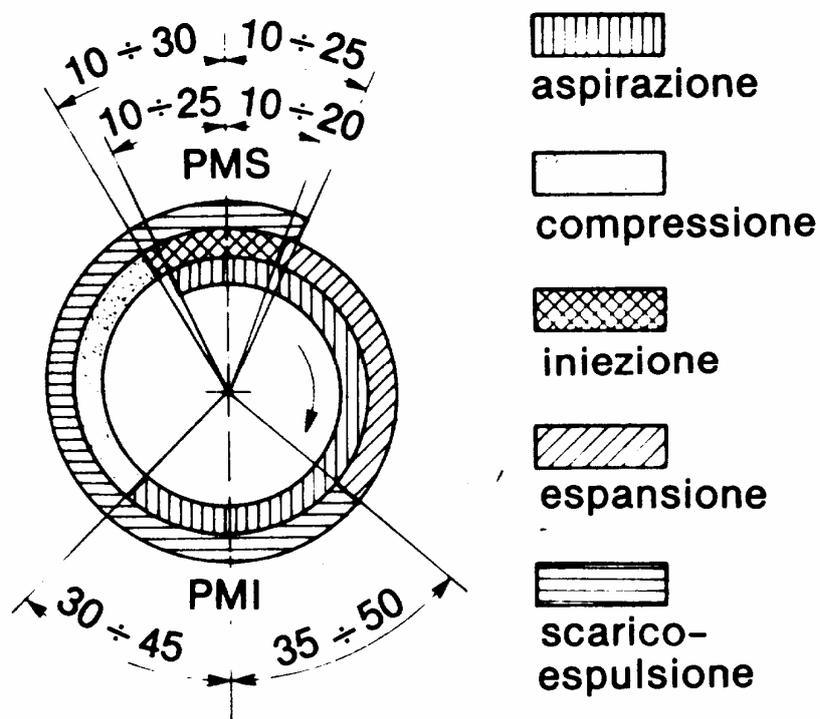


Fig. 13: diagramma della distribuzione di un motore diesel

L'operazione del lavaggio dei cilindri consiste dunque nell'espulsione dei gas combusti rimasti nel cilindro al termine dello scarico spontaneo (che si manifesta nell'intervallo di tempo che intercorre fra l'apertura delle luci di scarico e quelle di lavaggio).

Poiché il pistone assorbe lavoro dal combustibile, si comprende che il lavoro di lavaggio pesa negativamente sul bilancio del lavoro complessivo.

Per calcolare il lavoro di lavaggio, è importante la conoscenza dell'area del ciclo di pompaggio, che rappresenta con buona approssimazione il lavoro speso per l'aspirazione della carica e per l'espulsione dei gas di combustione e cioè l'altezza Δp_m del rettangolo equivalente di base V (figura 14).

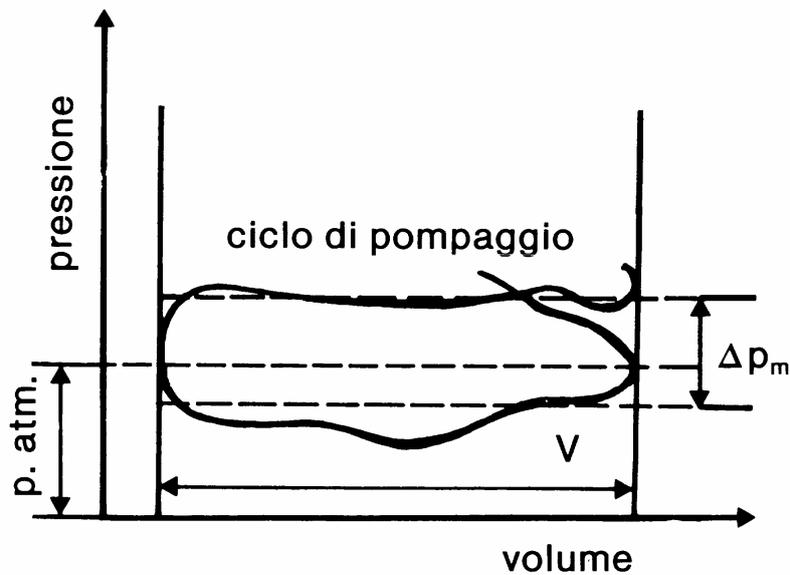


Fig. 14: esempio di ciclo di pompaggio di un motore

Δp_m è proporzionale alla media quadratica delle velocità d'efflusso del fluido all'aspirazione e allo scarico attraverso i seggi delle valvole e,

poiché tali velocità sono legate a quelle dello stantuffo, in prima approssimazione, nel rapporto tra le sezioni di passaggio delle valvole e la sezione del cilindro, si può scrivere orientativamente:

$$\Delta p_m = k \cdot p \cdot u_m^2 \quad (16)$$

dove p è la pressione esterna (a monte della marmitta) e u_m la velocità media dello stantuffo:

$$u_m \cong \frac{2}{\pi} \cdot u \quad (17)$$

con $u = \omega \cdot R$, pari alla velocità del bottone di manovella;

ω = velocità di rotazione del motore (rad/sec);

R = raggio della manovella.

Misurando u e u_m in m/s, si può assumere k intorno a $3 \cdot 10^{-3}$.

Con questi dati, è possibile calcolare il lavoro di lavaggio attraverso la relazione:

$$L_{lav} = -\Delta p_m \cdot V_{cil} \quad (18)$$

dove V_{cil} è il volume del cilindro.

Con la marmitta tradizionale, costituita da una struttura a labirinto,

il lavoro di lavaggio compiuto dal pistone per espellere i gas combusti risulta maggiore rispetto a quello con la marmitta elettronica, costituita da un tubo liscio. Infatti i gas combusti sono meno ostacolati nella fuoriuscita dal condotto di scarico e quindi Δp_m risulta minore.

Il lavoro complessivo si compone di due termini: un lavoro positivo, L_{mot} , dovuto al ciclo motore (racchiuso dalle trasformazioni di compressione, combustione ed espansione) ed un lavoro negativo, L_{lav} , dovuto al ciclo di lavaggio (racchiuso dalle trasformazioni di scarico ed aspirazione):

$$L_{compl} = L_{mot} + L_{lav} \quad (19)$$

Si deduce quindi che, diminuendo il lavoro associato al ciclo di lavaggio, si produce un aumento del lavoro complessivo e, di conseguenza, anche un incremento del rendimento del motore:

$$\eta = \frac{L_{compl}}{H_i \cdot m_c} \quad (20)$$

dove:

H_i = potere calorifico inferiore del combustibile, espresso in $\frac{KJ}{Kg}$;

m_c = massa del combustibile, espressa in Kg .

L'incremento del lavoro complessivo e del rendimento del motore comporta la diminuzione del consumo specifico:

$$c_s = \frac{m_c}{L_{\text{compl}}} = \frac{1}{\eta \cdot H_i} \quad (21)$$

2.2 Misure di pressione

E' stata effettuata una campagna di misure di pressione al fine di valutare le perdite di carico prodotte all'interno dei condotti di scarico della marmitta elettronica e di quella tradizionale in dotazione al veicolo. In particolare, è stata rilevata la differenza di pressione statica a monte e a valle delle due marmitte, utilizzando la seguente strumentazione:

- Ventilatore industriale ELVE KA 451 della F.lli Ferrari s.p.a., alimentato da un motore elettrico WEG 90S a 2 poli della potenza di 1.5 kW.
- Tubo estensibile in alluminio (lunghezza 1m estensibile a 3m, di diametro 120 mm).
- Anemometro elettronico mod.AS85 della Salmoiraghi, utile per valutare la velocità istantanea della corrente d'aria prodotta dal motore elettrico. E' costituito da un anello cilindrico del diametro di 100 mm avente la funzione di proteggere la ventolina e di indirizzare il flusso d'aria perpendicolarmente al piano della stessa, al fine di eliminare gli errori di piazzamento dello strumento rispetto alla direzione della corrente d'aria in esame. La ventolina, formata da 10 palette, è costruita

in materiale leggerissimo e quindi a piccolo momento d'inerzia, in modo da poter seguire il più fedelmente possibile l'andamento della velocità istantanea. Mediante un display è possibile la lettura della velocità del flusso d'aria espressa in m/s.

- Riduttore di sezione 125/63, che permette di passare dalla sezione del tubo estensibile a quella, molto più ridotta, dei condotti di scarico delle marmitte.
- Tubo in acciaio Inox di lunghezza 700 mm e diametro 60 mm.
- Condotto in plastica di lunghezza 220 mm e diametro 75 mm, sul quale è applicato il sensore che rileva la pressione statica a monte delle marmitte, posizionate in serie al condotto in plastica.
- Manometro ad acqua, realizzato con un tubicino di materiale plastico ripiegato ad U riempito di acqua colorata. Ad un'estremità è collegato il condotto di plastica dove è rilevata la pressione statica a monte della marmitta, l'altra estremità è aperta verso l'esterno (per valutare la pressione statica a valle della marmitta). Valori diversi della differenza tra le pressioni statiche a monte ed a valle della marmitta sono dovuti a diverse portate di aria all'interno del condotto e producono differenti spostamenti della colonna d'acqua contenuta all'interno del tubicino. La pressione differenziale è quindi valutata in millimetri di colonna d'acqua che si spostano e può essere riportata in Pascal semplicemente moltiplicando il valore ottenuto per la densità dell'acqua (998 Kg/m^3) e per l'accelerazione di gravità g. Lo strumento realizza-

to si è dimostrato utile per valutare differenze di pressione statica oltre i 150 Pa.

- Manometro differenziale DPA-100P della Kytola, utile per rilevare differenze di pressione statica fino a circa 150 Pa.

Nelle figure 15 e 16 sono riportati lo schema e la foto della disposizione della strumentazione utilizzata nelle misure di pressione.

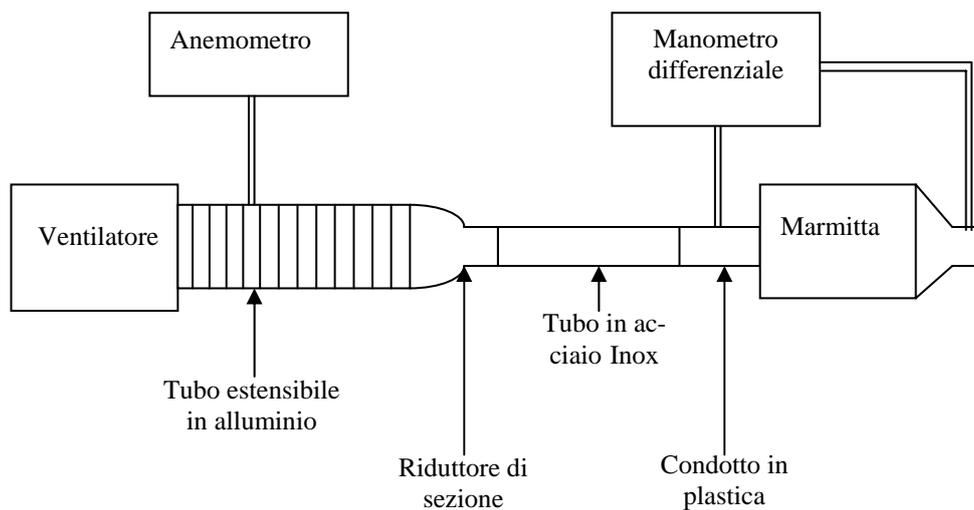


Fig. 15: *schema della strumentazione utilizzata nelle misure di pressione*



Fig. 16: *foto della strumentazione utilizzata nelle misure di pressione*

In tabella 4 sono riportati i valori misurati della differenza di pressione statica a monte e a valle della marmitta tradizionale e di quella elettronica ed i corrispondenti valori di velocità istantanea della corrente d'aria forniti dall'anemometro; utilizzando i valori di velocità rilevati, è stata inoltre calcolata la portata volumetrica, espressa in m^3/h . In figura 17 sono rappresentati gli andamenti della differenza di pressione statica a monte e a valle della marmitta tradizionale e di quella elettronica in funzione della portata.

Tabella 4: valori misurati della differenza di pressione statica

Velocità (m/s)	Portata (m ³ /h)	Marmitta tradizionale	Marmitta elettronica
		Pressione (Pa)	Pressione (Pa)
0	0	0.0	0.0
1.5	42.4	1.0	0.0
2	56.5	4.0	0.0
3	84.8	17.0	2.0
4	113.1	35.0	14.0
5	141.4	59.0	30.0
6	169.6	91.0	50.0
7	197.9	130.0	68.0
8	226.2	166.2	117.3
9	254.5	215.1	136.9
10	282.7	273.8	195.6
11	311.0	332.5	234.7
12	339.3	410.7	273.8
13	367.6	508.5	322.7
14	395.8	606.3	371.6
15	424.1	723.7	420.5
16	452.4	831.3	498.8
17	480.7	968.2	557.4
19	537.2	1222.5	800.31
19.5	550	1313.8	870.6
21.2	600	1621.4	1145.0
23	650	1971.2	1323.3
24.8	700	2365.8	1513.2
26.5	750	2808.2	1714.4
28.3	800	3301.1	1926.7
30.1	850	3847.5	2149.8
31.8	900	4450.5	2383.5
33.6	950	5113.1	2627.5
35.4	1000	5838.6	2881.6
37.1	1050	6630.2	3145.6
38.9	1100	7491.2	3419.1
40.7	1150	8425.1	3702.0
42.4	1200	9435.2	3994.0
44.2	1250	10525.1	4294.9
46	1300	11698.6	4604.4
47.7	1350	12959.1	4922.3
49.5	1400	14310.6	5248.4
51.3	1450	15756.8	5582.4
53.1	1500	17301.7	5924.1

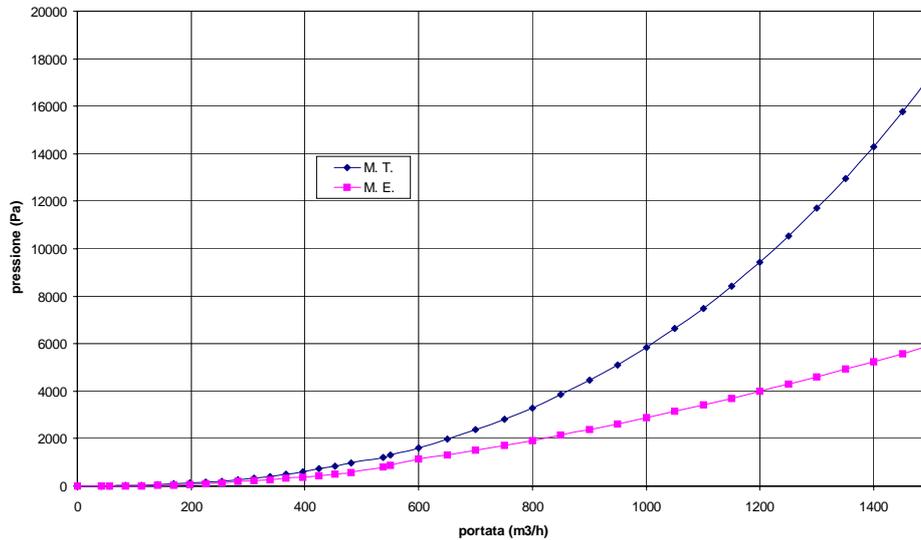


Fig. 17: andamenti della differenza di pressione statica nel caso di marmita tradizionale e di quella elettronica

In funzione del numero di giri al minuto (rpm), è stata calcolata la portata volumetrica G_h , espressa in m^3/h , mediante la relazione:

$$G_h = \left(\frac{\text{rpm}}{120} \right) \cdot 3600 \cdot \frac{P_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{P_2 \cdot T_1} \quad (22)$$

dove: $\frac{\text{rpm}}{120}$ = numero di espulsioni al secondo;

T_1, P_1, V_1 = temperatura, pressione e volume all'interno dei cilindri all'inizio del ciclo di lavaggio;

T_2, P_2 = temperatura e pressione dei gas combusti.

La portata può essere espressa in m³/s mediante la formula:

$$G_s = \frac{G_h}{3600} \quad (23)$$

Nota G_s , mediante i valori di differenza di pressione misurati a monte e valle della marmitta tradizionale e di quella elettronica, è possibile calcolare la potenza persa nei due casi:

$$W_{\text{persa}} = G_s \cdot \Delta P \quad (24)$$

Con questo dato possono essere valutate le perdite di carico percentuali:

$$\text{Perdite} = \frac{W_{\text{persa}}}{W_{\text{motore}}} \cdot 100 \quad (25)$$

dove W_{motore} è la potenza del motore.

In tabella 5 sono riportati i valori, calcolati al variare del numero di giri rpm, di potenza persa e di perdite percentuali sia nel caso di marmitta tradizionale che elettronica. Nelle figure 18 e 19 sono rappresentati, rispettivamente, gli andamenti della potenza persa e delle perdite percentuali in funzione del numero di giri rpm.

Tabella 5: valori calcolati di potenza persa e di perdite percentuali

rpm	Marmitta tradizionale		Marmitta elettronica	
	Potenza persa (KW)	Perdite (%)	Potenza persa (KW)	Perdite (%)
900	0.015165	0.019694	0.009651	0.012534
1000	0.021448	0.027854	0.015322	0.019899
1100	0.02865	0.037208	0.020223	0.026264
1200	0.038606	0.050137	0.025737	0.033425
1300	0.051782	0.06725	0.032862	0.042677
1400	0.066491	0.086352	0.040752	0.052925
1500	0.085035	0.110435	0.049409	0.064167
1600	0.10419	0.135311	0.062516	0.08119
1700	0.128932	0.167444	0.074227	0.096399
1800	0.152835	0.198486	0.094498	0.122725
1900	0.181949	0.236297	0.119113	0.154692
2000	0.21868	0.284	0.160417	0.208334
2100	0.258384	0.335564	0.183951	0.238897
2200	0.303115	0.393656	0.209614	0.272226
2300	0.353272	0.458794	0.237486	0.308424
2400	0.40927	0.531519	0.267647	0.347594
2500	0.471543	0.612394	0.300174	0.389836
2600	0.540541	0.702002	0.335143	0.435251
2700	0.616732	0.800951	0.37263	0.483935
2800	0.700602	0.909872	0.412707	0.535983
2900	0.792653	1.029419	0.455447	0.59149
3000	0.893408	1.16027	0.500921	0.650547
3100	1.003408	1.303127	0.549198	0.713245
3200	1.123211	1.458716	0.600346	0.779671
3300	1.253398	1.62779	0.654432	0.849912
3400	1.394566	1.811125	0.711521	0.924053
3500	1.547334	2.009524	0.771677	1.002177
3600	1.712339	2.223817	0.834962	1.084366
3700	1.890242	2.454859	0.901439	1.1707
3800	2.08172	2.703533	0.971166	1.261255
3900	2.287475	2.970747	1.044203	1.356108
4000	2.508229	3.25744	1.120607	1.455334
4100	2.744724	3.564577	1.200435	1.559006
4200	2.997726	3.893151	1.28374	1.667195
4300	3.268022	4.244185	1.370577	1.77997
4400	3.556422	4.61873	1.460997	1.897399
4500	3.863759	5.017868	1.555052	2.019548

continua

Realizzazione di sistemi di controllo attivo del rumore allo scarico di motori a 4 tempi

rpm	Marmitta tradizionale		Marmitta elettronica	
	Potenza persa (KW)	Perdite (%)	Potenza persa (KW)	Perdite (%)
4600	4.190887	5.442711	1.652791	2.146482
4700	4.538686	5.894398	1.754263	2.278264
4800	4.908059	6.374102	1.859515	2.414954
4900	5.299931	6.883027	1.968592	2.556613
5000	5.715253	7.422406	2.08154	2.703299
5100	6.155	7.993507	2.198402	2.855068
5200	6.620172	8.597626	2.31922	3.011974
5300	7.111794	9.236096	2.444036	3.174072
5400	7.630916	9.91028	2.572888	3.341413
5500	8.178613	10.62158	2.705816	3.514047
5600	8.755988	11.37141	2.842857	3.692022
5700	9.364168	12.16126	2.984047	3.875385
5800	10.00431	12.99261	3.129421	4.064183
5900	10.67759	13.867	3.279013	4.258459
6000	11.38522	14.786	3.432856	4.458255

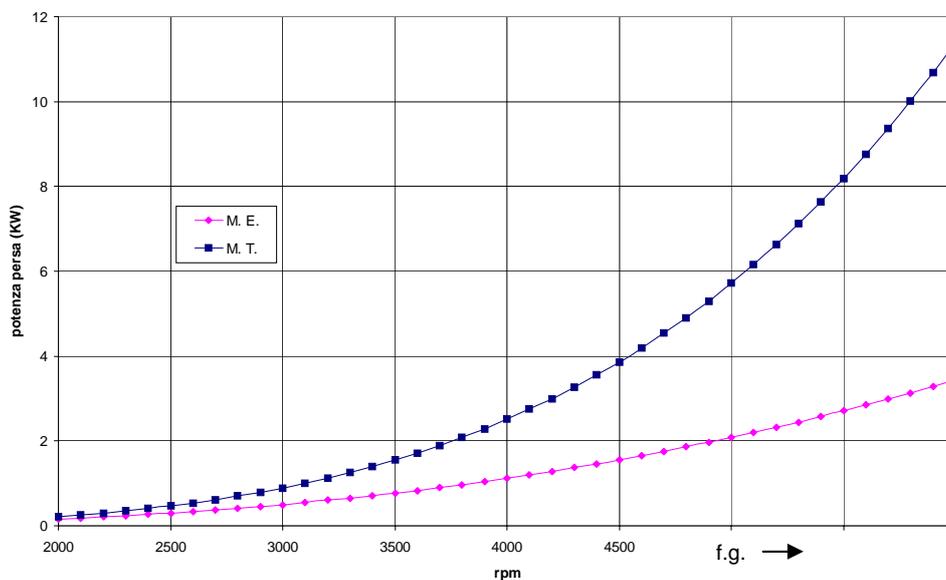


Fig. 18: andamenti della potenza persa in funzione del numero di giri

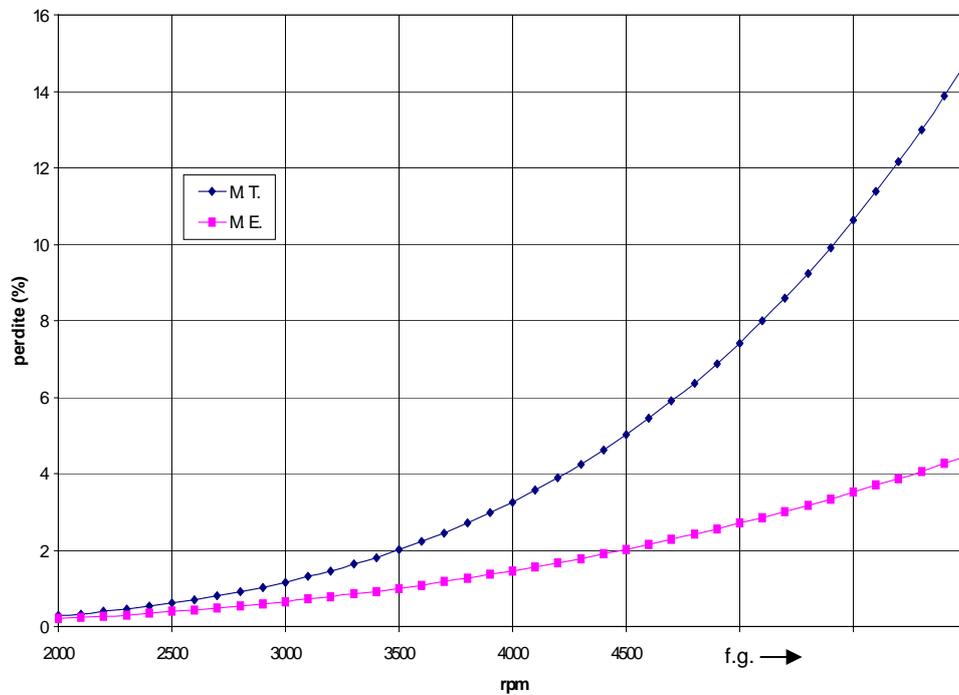


Fig. 19: andamenti delle perdite percentuali in funzione del numero di giri rpm

Dall'osservazione delle figure 18 e 19, è evidente che, al crescere del numero dei giri rpm, le perdite di carico introdotte dalla marmitta tradizionale risultano notevolmente maggiori rispetto a quelle introdotte dalla marmitta elettronica.

Considerando, ad esempio, il caso di rpm=4000, si ottiene:

$$G_h = 1128 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (26)$$

$$G_s = 0.3133 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (27)$$

In corrispondenza al valore calcolato della portata volumetrica, le differenze di pressione statica a monte e a valle della marmitta tradizionale e di quella elettronica sono rispettivamente:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{M.T.}} &= 8004.98 \text{ [Pa]} \\ \Delta P_{\text{M.E.}} &= 3576.40 \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (28)$$

Mediante tali valori si ricava la potenza persa nei due casi:

$$\begin{aligned} W_{\text{persa M.T.}} &= 2.50 \text{ [KW]} \\ W_{\text{persa M.E.}} &= 1.12 \text{ [KW]} \end{aligned} \quad (29)$$

Le perdite di carico percentuali che si ottengono nei due casi sono dunque:

$$\begin{aligned} \text{Perdite}_{\text{M.T.}} &= 3.24 \text{ [%]} \\ \text{Perdite}_{\text{M.E.}} &= 1.45 \text{ [%]} \end{aligned} \quad (30)$$

Da ciò si evince che con la marmitta elettronica si ottiene un miglioramento delle prestazioni di circa il 2%.

2.3 Prova su strada

In data 29 novembre 2000, presso l'Autodromo dell'Umbria (Maggione), è stata effettuata una prova di consumi su strada con l'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD per verificare il consumo di carburante dell'automobile equipaggiata con il prototipo di marmitta elettronica.

La prova è stata eseguita tra le 17.00 e le 17.30 circa nelle seguenti condizioni:

- assenza di vento,
- strada asciutta,
- temperatura dell'aria esterna pari a 7°C,
- finestrini dell'autovettura chiusi,
- impianto di condizionamento dell'aria spento,
- presenza di due persone a bordo, compreso il conducente: P.I. Leandro Lunghi ed Ing. Andrea Nicolini.

Dopo aver effettuato alcuni giri di prova allo scopo di eseguire la prova a motore caldo, è stata posizionata la vettura sul circuito ed è stato riempito il serbatoio fino all'orlo.

La prova è stata eseguita con partenza da fermo ed, in terza marcia, sono stati percorsi 25.2 Km dell'Autodromo (corrispondenti a circa 10 giri di pista) alla velocità costante di 50 Km/h, con velocità di rotazione del motore pari circa a 2000 rpm.

Al termine della prova, mediante un recipiente graduato, è stato di nuovo riempito il serbatoio fino all'orlo, utilizzando una quantità di

carburante pari a 1.95 litri.

In data 1 dicembre 2000, presso l'Autodromo dell'Umbria (Magione), è stata effettuata una prova di consumi su strada con l'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD per verificare il consumo di carburante dell'automobile equipaggiata con la marmitta di serie in dotazione al mezzo.

La prova è stata eseguita tra le 17.00 e le 17.30 circa nelle seguenti condizioni:

- assenza di vento,
- strada asciutta,
- temperatura dell'aria esterna pari a 6°C,
- finestrini dell'autovettura chiusi,
- impianto di condizionamento dell'aria spento,
- presenza di due persone a bordo, compreso il conducente: P.I. Leandro Lunghi ed Ing. Andrea Nicolini.

Dopo aver effettuato alcuni giri di prova allo scopo di eseguire la prova a motore caldo, è stata posizionata la vettura sul circuito ed è stato riempito il serbatoio fino all'orlo.

La prova è stata eseguita con partenza da fermo ed, in terza marcia, sono stati percorsi 25.2 Km dell'Autodromo (corrispondenti a circa 10 giri di pista) alla velocità costante di 50 Km/h, con velocità di rotazione del motore pari circa a 2000 rpm.

Al termine della prova, mediante un recipiente graduato, è stato di

nuovo riempito il serbatoio fino all'orlo, utilizzando una quantità di carburante pari a 1.99 litri.

Confrontando le quantità di carburante utilizzate nelle due prove effettuate, si è verificato che, sostituendo la marmitta di serie in dotazione al veicolo con il prototipo di marmitta elettronica, si ottiene un risparmio del consumo di carburante leggermente superiore al 2%.

2.4 Prova da fermo

In data 5 dicembre 2000, nel piazzale antistante il Laboratorio di Acustica – Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Perugia, è stata effettuata una prova di consumi da fermo con l'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD per verificare il consumo di carburante dell'automobile equipaggiata con il prototipo di marmitta elettronica.

La prova è stata eseguita tra le 10.45 e le 15.45 nelle seguenti condizioni:

- assenza di vento,
- finestrini dell'autovettura chiusi,
- impianto di condizionamento dell'aria spento.

Inizialmente è stata posizionata la vettura ed è stato riempito il serbatoio fino all'orlo. La prova è stata eseguita mantenendo l'autovettura in moto per 5 ore a folle con una velocità di rotazione del motore pari circa a 2800 rpm.

Al termine della prova, mediante un recipiente graduato, è stato di nuovo riempito il serbatoio fino all'orlo, utilizzando una quantità di carburante pari a 9.7 litri.

In data 6 dicembre 2000, nel piazzale antistante il Laboratorio di Acustica – Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli Studi di Perugia, è stata effettuata una prova di consumi da fermo con l'autovettura FIAT Marea SW 1900 JTD per verificare il consumo di carburante dell'automobile equipaggiata con la marmitta di serie in dotazione al mezzo.

La prova è stata eseguita tra le 10.45 e le 15.45 nelle seguenti condizioni:

- assenza di vento,
- finestrini dell'autovettura chiusi,
- impianto di condizionamento dell'aria spento.

Inizialmente è stata posizionata la vettura ed è stato riempito il serbatoio fino all'orlo. La prova è stata eseguita mantenendo l'autovettura in moto per 5 ore a folle con una velocità di rotazione del motore pari circa a 2800 rpm.

Al termine della prova, mediante un recipiente graduato, è stato di nuovo riempito il serbatoio fino all'orlo, utilizzando una quantità di carburante pari a 9.9 litri.

Confrontando le quantità di carburante utilizzate nelle due prove effettuate, si è verificato che, sostituendo la marmitta di serie in dotazione

al veicolo con il prototipo di marmitta elettronica, si ottiene un risparmio del consumo di carburante leggermente superiore al 2%.

2.5 Commenti ai risultati delle prove di consumi

Attraverso una campagna di misure di pressione, sono state valutate le perdite di carico prodotte all'interno dei condotti di scarico della marmitta elettronica e di quella tradizionale in dotazione; in particolare è stata rilevata la differenza di pressione statica a monte e a valle delle due marmitte. Dall'osservazione delle figure 18 e 19, si rileva che, al crescere del numero di giri del motore, le perdite di carico introdotte dalla marmitta tradizionale sono notevolmente maggiori rispetto a quelle introdotte dalla marmitta elettronica. Dal calcolo effettuato con rpm=4000, si è osservato che, sostituendo la marmitta tradizionale in dotazione al veicolo con la marmitta elettronica, si ottiene un miglioramento delle prestazioni di circa il 2%.

Questo risultato era prevedibile poiché la marmitta tradizionale, a differenza di quella elettronica, costituita da un tubo liscio, è composta da una struttura a labirinto; di conseguenza i gas combusti sono maggiormente ostacolati nella fuoriuscita dal condotto di scarico ed il lavoro di lavaggio compiuto dal pistone per espellere i gas combusti risulta maggiore rispetto a quello compiuto con la marmitta elettronica. Diminuendo il lavoro associato al ciclo di lavaggio, si produce un aumento del lavoro complessivo e, quindi, anche un incremento del rendimento del motore

con conseguente diminuzione del consumo specifico.

Le prove di consumi effettuate, su strada e da fermo, hanno confermato che, sostituendo la marmitta di serie in dotazione al veicolo con il prototipo di marmitta elettronica, si ottiene un incremento del rendimento leggermente superiore al valore teorico, pari al 2%, valutato mediante le misure di pressione descritte nel paragrafo 2.2.

3. Sviluppo di algoritmi di controllo per il rumore prodotto dal motore a quattro tempi

3.1 Teoria e strutture per il controllo attivo del rumore

Un sistema di controllo attivo del rumore si compone generalmente di due parti: elettroacustica ed elettronica.

La prima è costituita dall'insieme dei microfoni, utilizzati per prelevare i segnali necessari all'implementazione dell'algoritmo di controllo, e degli altoparlanti, usati per generare il segnale di antirumore.

La parte elettronica è costituita dalla scheda DSP, che permette di implementare l'algoritmo di controllo elaborando i segnali digitali di riferimento e di errore ottenuti campionando i segnali analogici provenienti dai relativi microfoni; mediante amplificatore è possibile garantire la potenza richiesta dall'altoparlante di antirumore.

Sono possibili due approcci nella progettazione di un sistema di controllo adattivo: feedforward e feedback. La rappresentazione semplificata di un sistema di controllo attivo feedforward è riportata in figura 20.

Lo scopo dell'adattamento del sistema di controllo feedforward, $C(q^{-1},k)$, è quello di cancellare il rumore nella posizione (c), in corrispondenza all'uscita dalla marmitta elettronica. Questo rumore si origina da una sorgente corrispondente al punto (a), dove è posto un microfono che rileva il segnale che, successivamente, viene filtrato attraverso $C(q^{-1},k)$ ed inviato all'altoparlante. L'altoparlante emette un antirumore, denominato

anche rumore secondario, per cancellare il rumore primario in corrispondenza della posizione (c).

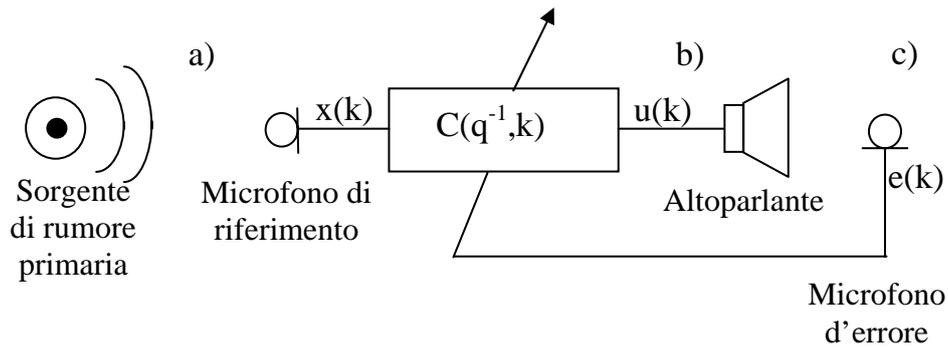


Fig. 20: schema a blocchi di controllo attivo del rumore "feedforward"

Il sistema di controllo attivo del rumore, appena descritto, è illustrato nel diagramma a blocchi di figura 21.

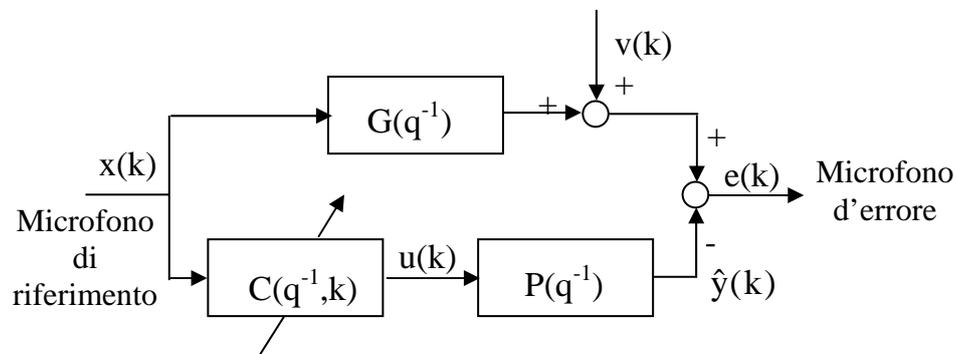


Fig. 21: struttura di un controllo "feedforward" adattivo

Le dinamiche di propagazione acustica sono rappresentate da $G(q^{-1})$. Il sistema altoparlante/microfono è rappresentato da $P(q^{-1})$. Il se-

gnale $v(k)$ rappresenta il rumore incorrelato al segnale di rumore primario $x(k)$. L'obiettivo è di determinare un ingresso, $u(k)$, di controllo al sistema $P(q^{-1})$, tale che l'uscita di $P(q^{-1})$ sia sfasata di 180° rispetto a quella di $G(q^{-1})$: ciò è reso possibile adattando i parametri del sistema di controllo. Il nodo di somma rappresenta la sovrapposizione delle due onde sonore: solo i segnali provenienti dal microfono di errore, $e(k)$, e dal microfono di riferimento, $x(k)$, possono essere utilizzati nell'adattamento.

Quando non è disponibile il segnale proveniente dal microfono di riferimento, può essere usata una struttura "feedback". Una stima del rumore primario, $d(k)$, è ottenuta introducendo un modello matematico del blocco $G(q^{-1})$ nell'algoritmo, come mostrato in figura 22. Se il modello predice perfettamente l'uscita del blocco suddetto, il rumore stimato, $\hat{d}(k)$, si combina esattamente con il rumore presente.

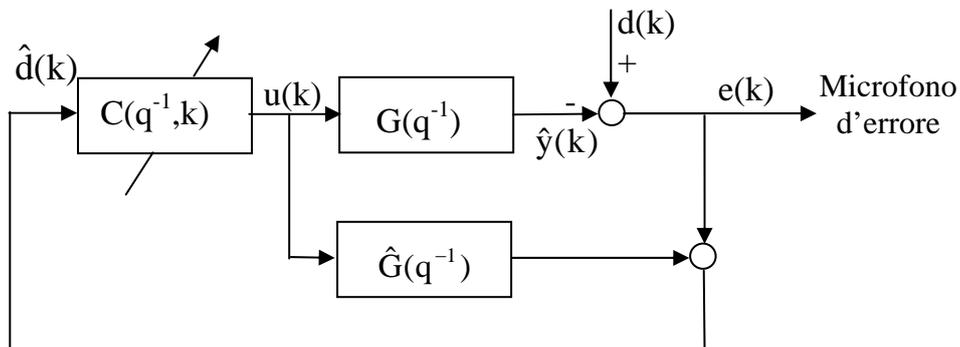


Fig. 22: struttura di un controllo "feedback" adattivo

3.2 L'unità di controllo

La marmitta elettronica è il dispositivo elettroacustico che emette il segnale dell'antirumore e provvede all'accoppiamento con il rumore prodotto dal motore.

Il segnale dell'antirumore viene generato da un'unità di controllo: il funzionamento dell'unità di controllo è basato su tecniche di elaborazione numerica del segnale; in particolare il segnale prelevato da un apposito microfono viene opportunamente "trattato" in modo che sia minimo il segnale acustico di uscita dalla marmitta elettronica. A tale proposito un microfono (microfono d'errore) verifica l'ampiezza del segnale acustico in uscita alla marmitta stessa.

In figura 23 si riporta lo schema di funzionamento dell'unità di controllo.

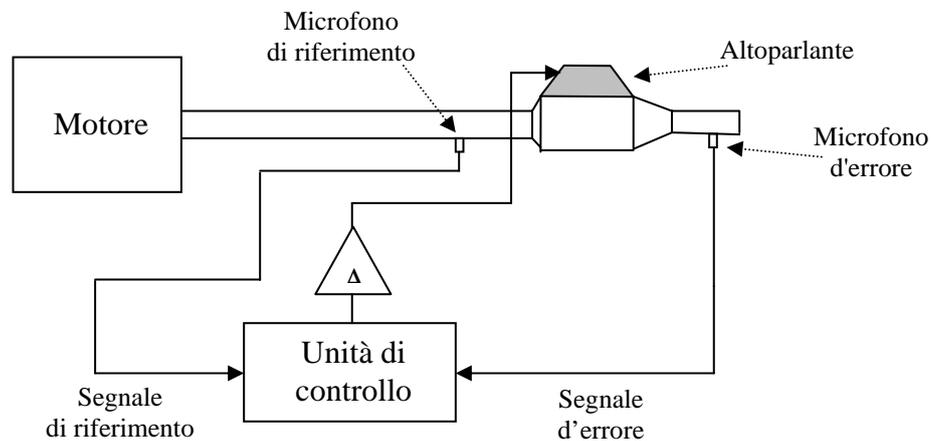


Fig. 23: schema di funzionamento dell'unità di controllo

L'elaborazione numerica del segnale di riferimento, prelevato all'ingresso del condotto di scarico della marmitta elettronica, viene effettuata grazie ad algoritmi di concezione originale.

Il segnale di antirumore generato dall'unità di controllo (vedere figura 23) viene amplificato mediante un amplificatore lineare di potenza che alimenta l'altoparlante installato nella marmitta elettronica.

L'unità di controllo è costituita da un DSP (Digital Signal Processing) ADSP 21061, appartenente alla famiglia ADSP 21000, prodotto dalla Analog Devices, con architettura SHARC. Questo DSP, specifico per il processamento di segnali vocali, sonori e grafici, lavora a 32 bit in virgola mobile. Nella famiglia ADSP-21000, lo SHARC costituisce il cuore del DSP per formare un sistema completo sul chip, aggiungendo una porta duale sulla SRAM e periferiche I/O integrate supportate da bus I/O dedicati. Il processore, che può eseguire ogni istruzione in un singolo ciclo, è formato da tre unità computazionali, un Program Sequencer, due generatori di indirizzi dei dati (DAG), il timer, la cache delle istruzioni e un file di registro dei dati.

Poiché il processore esegue le istruzioni del programma in modo sequenziale, il flusso di programma in tale DSP è lineare; delle variazioni in questo flusso lineare sono provocate dalla presenza delle seguenti strutture:

- Loops: sequenza di istruzioni che il processore deve eseguire diverse volte con zero-overhead, cioè ripetendo l'istruzione senza utilizzare il tempo altrimenti necessario per saltare all'inizio dell'istruzione stessa.

- Subroutines: il flusso sequenziale viene interrotto temporaneamente per eseguire delle istruzioni in un'altra parte della memoria del programma.
- Jumps: il flusso di programma è temporaneamente trasferito in un'altra parte della memoria del programma.
- Interrupts: costituiscono un caso particolare di subroutines; in questo caso, però, l'esecuzione della routine è condizionata da un evento che accade al tempo d'avvio e non da un'istruzione del programma. Quando avviene un interrupt, il processore si dedica a quest'ultimo e continua la normale esecuzione.
- Idle: mediante questa istruzione viene eseguita la cessazione delle operazioni in corso sul processore, mantenendo lo stato attuale.

Queste strutture di programma sono gestite dal Program Sequencer che svolge una vasta gamma di altre funzioni, fra cui quella di selezionare l'indirizzo della successiva istruzione da eseguire.

I DAGs, mantenendo i puntatori in memoria, permettono di semplificare l'organizzazione dei dati; essi forniscono indirizzamenti immediati o indiretti. Il DAG1 genera indirizzi a 32 bit sul bus degli indirizzi DM, mentre il DAG2 genera indirizzi a 24 bit sul bus degli indirizzi PM.

Program Sequencer e DAGs consentono di ottenere la massima efficienza nell'esecuzione delle operazioni, poiché le unità computazionali si dedicano esclusivamente al processamento dei dati.

Il processore include, inoltre, un timer ad intervalli programmabili

che può generare interrupt periodici; viene programmato scrivendo i valori nei suoi due registri e le operazioni possono essere controllate attraverso un bit in un registro apposito. Un'uscita esterna, TIMEXP, segnala agli altri dispositivi che il contatore del timer è scaduto.

Per trasferire dati tra le unità computazionali ed i bus dati è utilizzato un file di registro, che consente anche la memorizzazione dei risultati intermedi. E' composto da 10 porte che contengono 32 registri, di cui 16 primari ed i rimanenti secondari, che, combinati con un architettura di tipo Harvard, permettono un flusso incondizionato dei dati tra le unità computazionali e la memoria interna.

La memoria è suddivisa in due blocchi: uno specifico per il programma, l'altro utilizzato per l'immagazzinamento dei dati.

L'Accesso Diretto in Memoria (DMA) fornisce vari tipi di meccanismi per il trasferimento di un intero blocco di dati, ciascuno in ambedue le direzioni:

- dalla memoria interna a quella esterna e a quella delle periferiche mappate in memoria;
- dalla memoria interna al processore ospite;
- dalla memoria esterna alle periferiche esterne;
- dalla memoria interna alle porte seriali I/O;
- dalla propria memoria interna a quella di un altro ADSP 2106X.

Il DSP 21061 è, inoltre, dotato di due porte seriali sincrone indipendenti, SPORT0 e SPORT1. Esse possono trasmettere e ricevere indipen-

dentemente consentendo una maggiore flessibilità per le comunicazioni seriali; forniscono un'interfaccia I/O ad una grande varietà di dispositivi periferici.

In figura 24 è schematizzata la scheda in cui è contenuto il DSP appena descritto. Essa è dotata di una porta seriale RS-232 che permette la comunicazione con un host computer utilizzando protocolli seriali asincroni. Il software di sviluppo utilizzato consente comunque di controllare il corretto funzionamento del DSP attraverso una scheda emulatore EZ-ICE inserita in uno degli slot ISA del PC.

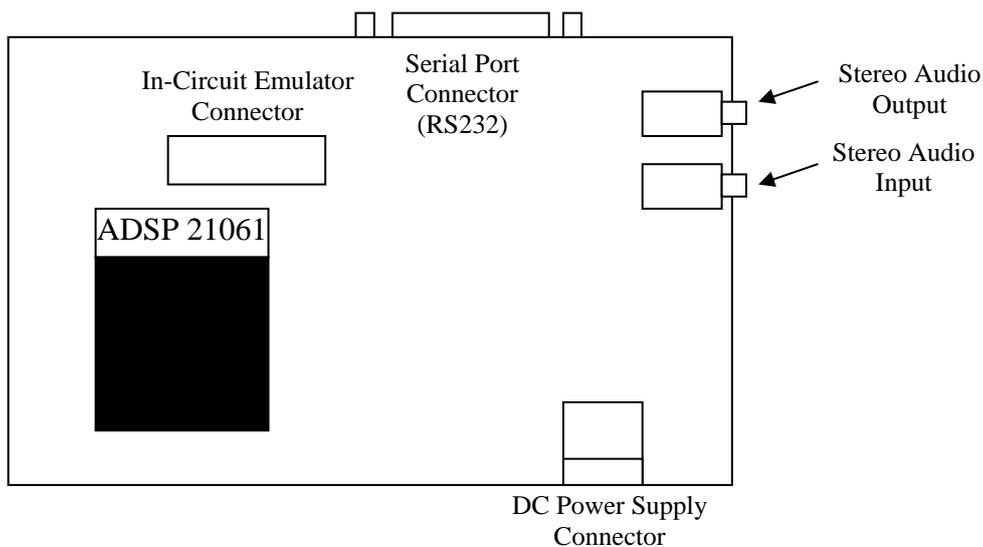


Fig. 24: *schema della scheda contenente il DSP*

Un connettore DC permette di alimentare la scheda utilizzando un alimentatore di tensione costante a 9 V.

Infine, grazie ad un opportuna scheda di conversione A/D, è possibile acquisire fino a due segnali elettrici ed elaborarli utilizzando il DSP. Una presa jack stereo permette di acquisire tali segnali.

In modo analogo, attraverso una scheda di conversione D/A e un'uscita jack stereo equivalente alla precedente è possibile ottenere fino a due segnali elettrici in uscita.

Nel caso in esame, la scheda DSP utilizza due segnali di ingresso: uno di riferimento (ottenuto mediante un microfono posizionato a monte della marmitta elettronica oppure mediante un accelerometro posto a contatto con le pareti, in materiale plastico, che rivestono il motore), strettamente correlato al rumore da eliminare, ed uno di errore, prelevato utilizzando un microfono posizionato a valle della marmitta elettronica. Il segnale di uscita, ossia l'antirumore, è ottenuto facendo passare il segnale di riferimento attraverso un filtro FIR, $C(q^{-1},k)$, i cui pesi sono aggiornati ad ogni intervallo di campionamento della scheda DSP attraverso un algoritmo adattivo Filtered-X LMS.

Con riferimento alla figura 25, l'unità di controllo, in generale, è in grado di realizzare il controllo del rumore elaborando un segnale, $x(n)$, che è proporzionale al regime di rotazione del motore; questo grazie ad algoritmi adattivi che, in funzione di un segnale d'errore prelevato all'uscita della marmitta, $e(n)$, consentono di minimizzare il segnale acustico all'uscita.

Il segnale d'errore $e(n)$ è dato dalla somma (corrispondente ad una differenza essendo i due segnali teoricamente in controfase) tra il rumore

presente all'uscita della marmitta e il segnale emesso dall'altoparlante; $x(n)$ è il rumore prodotto direttamente dal motore prima di percorrere il tubo di scappamento e di miscelarsi con quello di antirumore.

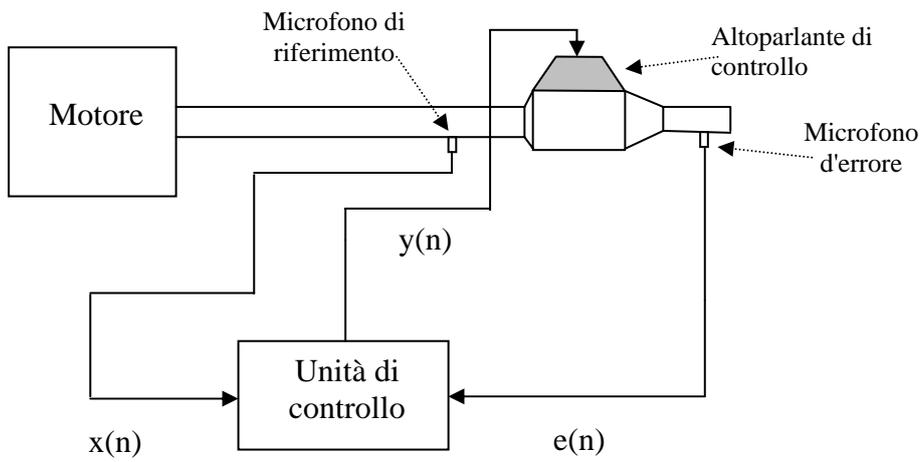


Fig. 25: schema di funzionamento dell'unità di controllo

Non essendo possibile prelevare il segnale di rumore $x(n)$ all'uscita della marmitta elettronica, essendo, in quel punto già miscelato con quello di antirumore, è stato scelto come segnale in ingresso al controllore ANC quello presente nel condotto di scarico in corrispondenza dell'ingresso della marmitta elettronica. L'altoparlante di controllo deve emettere un segnale di frequenza ed ampiezza uguali a quelle del rumore, ma con fase opposta in modo tale che il rumore all'uscita della marmitta sia minimizzato.

3.3 Algoritmo di controllo: “Filtered-X LMS”

L'algoritmo filtered-X LMS determina i coefficienti del filtro di controllo (vettore dei pesi) $C(q^{-1},k)$, che minimizza l'errore quadratico medio, $\xi = E[e^2(k)]$. L'errore quadratico medio è la potenza media del segnale proveniente dal microfono d'errore. A questo scopo è utilizzato un metodo del gradiente. Nella configurazione feedforward, la componente di $e(k)$, che è correlata con $x(k)$, viene rimossa, lasciando solo $v(k)$: è questa la caratteristica che garantisce la proprietà di selettività in un sistema.

Il vettore dei pesi del filtro di controllo,

$$\theta_C(k) = [c_0(k), c_1(k), \dots, c_{n_C}(k)]^T \quad (31)$$

è calcolato nella direzione del gradiente

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial \theta_C} E[e^2(k)] \quad (32)$$

Poiché il gradiente esatto non è disponibile, può essere utilizzata una stima. Nell'algoritmo LMS, il valore istantaneo dell'errore quadratico, $e^2(k)$, è utilizzato come stima dell'errore quadratico medio, $\xi = E[e^2(k)]$.

In questo modo, con questa semplice stima del gradiente

$$\hat{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \theta_C} e^2(\mathbf{k}), \quad (33)$$

l'algoritmo adattivo diventa

$$\hat{\theta}_C(\mathbf{k}) = \hat{\theta}_C(\mathbf{k}-1) + \frac{\mu}{2} \cdot \hat{\nabla}(\mathbf{k}), \quad (34)$$

dove μ è il parametro di adattamento (coefficiente di convergenza), che regola la velocità e la stabilità dell'adattamento.

Per determinare un'espressione di $\nabla(\mathbf{k})$, notiamo che

$$\hat{\nabla}(\mathbf{k}) = \frac{\partial}{\partial \theta_C} e^2(\mathbf{k}) = 2 \cdot e(\mathbf{k}) \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_C} e(\mathbf{k}) \quad (35)$$

e che, mantenendo i parametri del filtro di controllo costanti, risulta

$$e(\mathbf{k}) = d(\mathbf{k}) - P(q^{-1}) \cdot C(q^{-1}, \mathbf{k}) \cdot x(\mathbf{k}) = d(\mathbf{k}) - P(q^{-1}) \cdot \left[c_0 \cdot x(\mathbf{k}) + c_1 \cdot x(\mathbf{k}-1) + \dots + c_{n_C} \cdot x(\mathbf{k}-n_C) \right] \quad (36)$$

Quindi,

$$\frac{\partial}{\partial \theta_C} e(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial c_0} e(k) \\ \frac{\partial}{\partial c_1} e(k) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial c_{n_C}} e(k) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P(q^{-1}) \cdot x(k) \\ P(q^{-1}) \cdot x(k-1) \\ \vdots \\ P(q^{-1}) \cdot x(k-n_C) \end{bmatrix} \equiv -\underline{x}_P(k) \quad (37)$$

L'algoritmo del gradiente è dunque dato da

$$\hat{\theta}_C(k) = \hat{\theta}_C(k-1) - \mu \cdot \underline{x}_P \cdot e(k) \quad (38)$$

Si è, inoltre, tenuto conto del fatto che il segnale di antirumore prodotto dal DSP, prima di sommarsi al segnale di rumore in corrispondenza dell'uscita della marmitta elettronica, attraversa un percorso secondario costituito da un insieme di "ostacoli", tra i quali i convertitori D/A della scheda DSP, amplificatore, altoparlante di controllo, il tutto modellabile attraverso una funzione di trasferimento $P(q^{-1})$.

E' allora necessario determinare tale funzione di trasferimento on-line in modo da valutare ogni sua possibile variazione.

Lo schema a blocchi utilizzato a questo scopo è rappresentato in figura 26.

E' possibile utilizzare il segnale di controllo per valutare la funzione $\hat{P}(q^{-1})$, usata per filtrare il segnale impiegato per l'aggiornamento dei coefficienti del filtro $C(q^{-1},k)$.

Anche per il calcolo della funzione di trasferimento del percorso secondario è utilizzato l'algorithmo adattivo LMS.

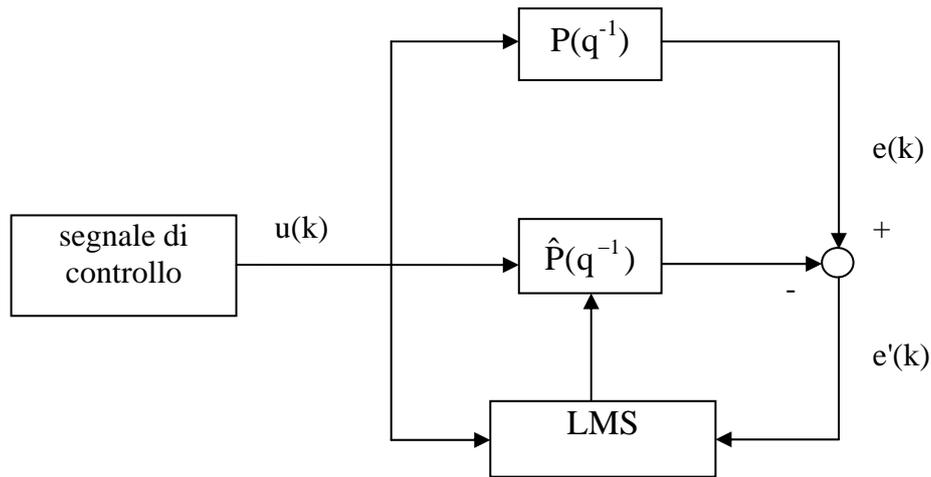


Fig. 26: schema a blocchi utilizzato per il calcolo della funzione di trasferimento del percorso secondario

Poiché i segnali costituenti il vettore $\underline{x}_p(k)$ non sono direttamente disponibili, l'algorithmo utilizza una stima, $\hat{P}(q^{-1})$, al posto di $P(q^{-1})$, così che, ad esempio, il componente $P(q^{-1}) \cdot x(k)$ del vettore suddetto può essere sostituito da $\hat{P}(q^{-1}) \cdot x(k)$. Perciò, viene utilizzata una versione filtrata di $x(k)$ per aggiornare il vettore dei pesi del controllore (da cui deriva il nome Filtered-X LMS).

Questa caratteristica è illustrata in figura 27.

L'algorithmo completo è dato da:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_C(k) &= \hat{\theta}_C(k-1) - \mu \cdot \underline{x}_P \cdot e(k) \\ \underline{x}_{\hat{p}}(k) &= [x_{\hat{p}}(k), x_{\hat{p}}(k-1), \dots, x_{\hat{p}}(k-n_C)]^T \\ x(k) &= [x(k), x(k-1), \dots, x(k-n_P)]^T \\ \hat{\theta}_C(k) &= [c_0(k), c_1(k), \dots, c_{n_C}(k)]^T \\ x_{\hat{p}}(k) &= \hat{P}(q^{-1}) \cdot x(k) \equiv \underline{\hat{p}}^T \cdot \underline{x}(k) \\ \underline{\hat{p}}(k) &= [\hat{p}_0, \hat{p}_1, \dots, \hat{p}_{n_P}]^T\end{aligned}\tag{39}$$

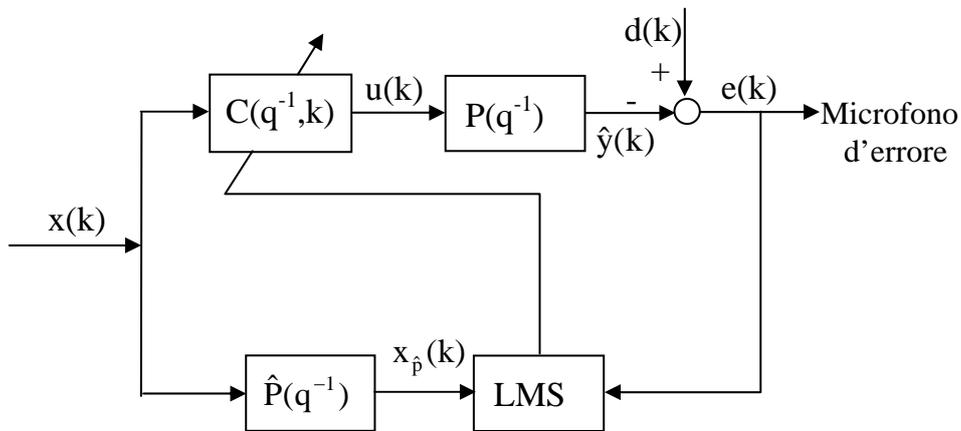


Fig. 27: schema a blocchi dell' algoritmo Filtered-X LMS (configurazione "feedforward" utilizzata)

L'algoritmo Filtered-X LMS, descritto nelle (39), converge quando il parametro μ è sufficientemente piccolo ed il modello stimato $\hat{P}(q^{-1})$ approssima adeguatamente il modello reale.

3.3.1 Sistema di sviluppo

L'algoritmo proposto è stato sviluppato mediante VISUAL-DSP, un ambiente di sviluppo integrato (IDE) per la realizzazione di applicazioni software specifiche per i DSP 21xxx dell'Analog Devices. L'IDE include l'accesso a tutte le attività necessarie per la creazione ed il debug di progetti DSP, comprese:

- editor di testo, che permette di creare e modificare file sorgente;
- definizione e gestione progetti all'interno dell'IDE, specificando i file che il processore SHARC, una volta assemblati, andrà ad eseguire;
- accesso e gestione del processore SHARC attraverso finestre di dialogo che permettono di specificare le varie opzioni possibili;
- compilazione dei file di progetto nei linguaggi C ed Assembler;
- analisi del comportamento del software progettato step by step;
- debug dei progetti;
- caricamento nel processore delle applicazioni progettate.

3.4 Listato del programma: algoritmo FxLMS

```
/* ADSP-2106x System Register bit definitions */
#include <def21060.h>
#include <21060.h>
#include <signal.h>
#include <sport.h>
#include <macros.h>
#include <math.h>
#include <filters.h>
#include <trans.h>
#include <complex.h>

/* DMA Chain pointer bit definitions */
#define CP_PCI 0x20000 // Program-Controlled Interrupts bit
#define CP_MAF 0x1ffff // Valid memory address field bits

#define SetIOP(addr, val) (* (int *) addr) = (val)
#define GetIOP(addr) (* (int *) addr)

#define mu1 0.00000000000004
#define mu 0.000000000000007
#define num 128
#define tt 0.00025
float riferimento[num];
float y,rifl,t,err,wn,wf,err1;
float Q[num],S[num],rif[num],bianco[num];

/*****

#define SZ_regs_1847 16
int regs_1847[SZ_regs_1847] = {
/* Note that the MCE bit is maintained throughout initial
programming to hold off premature autocalibration. */
    0xc000, /* index 0 - left input control */
    0xc100, /* index 1 - right input control */
    0xc280, /* index 2 - left aux 1 input control */
    0xc380, /* index 3 - right aux 1 input control */
    0xc480, /* index 4 - left aux 2 input control */
    0xc580, /* index 5 - right aux 2 input control */
    0xc600, /* index 6 - left dac control */
    0xc700, /* index 7 - right dac control */
```

```
    0xc850,                /* index 8 - data format */
    0xc909,                /* index 9 - interface configuration */
    0xca00,                /* index 10 - pin control */
    0xcb00,                /* index 11 - no register */
    0xcc40,                /* index 12 - miscellaneous information */
    0xcd00,                /* index 13 - digital mix control */
    0xce00,                /* index 14 - no register */
    0xf000;                /* index 15 - no register */

int rx_buf[3];           /* receive buffer */
int tx_buf[3] = {0xcc40, 0, 0}; /* transmit buffer */

/* DMA chaining Transfer Control Blocks */
typedef struct {
    unsigned lpath3;      /* for mesh multiprocessing */
    unsigned lpath2;      /* for mesh multiprocessing */
    unsigned lpath1;      /* for mesh multiprocessing */
    unsigned db;          /* General purpose register */
    unsigned gp;          /* General purpose register */
    unsigned** cp;        /* Chain Pointer to next TCB */
    unsigned c;           /* Count register */
    int im;               /* Index modifier register */
    unsigned * ii;        /* Index register */
} _tcb;

_tcb rx_tcb = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 1, 0}; // receive tcb
_tcb tx_tcb = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 1, 0}; // transmit tcb

int cmd_blk[8];          /* command block */

static int xmit_count;
static int * xmit_ptr;

static int source;
static int filter;
static int old_source;
static int old_filter;

/*****
/* Serial port transmit DMA complete */
*****/
void spt0_asserted( int sig_num )
{
```

```
        // Check if there are more commands left to transmit.
        if( xmit_count )
        {
/* If so, put the command into the transmit buffer and up-
date count.*/
            tx_buf[0] = *xmit_ptr++;
            xmit_count--;
        }
    }

/*****
/* Periodic timer interrupt */
*****/
void timer_hi_prior( int sig_num )
{
    float valoreattuale;
    int p,i;
    float rumore;

t=t+tt;    //variabile tempo

if (t<15){          /*Inizio del calcolo della funzione
di trasferimento*/
err=0.25*rx_buf[2];
wn=rand()*0.0001;    //generazione rumore bianco
for (p=num-1;p>0;p--) {
    bianco[p]=bianco[p-1];}
bianco[0]=wn;

wf=0;
for (p=0;p<=num-1;p++) {
    wf=wf+bianco[p]*S[p];} //wf = rumore bianco filtrato

tx_buf[1]=wn;
err1=(err-wf);
for (i=0;i<=num-1;i++) {
S[i]=S[i]+mul*err1*bianco[i];} //algoritmo LMS
}

else {          //algoritmo FxLMS

rumore=0.25*rx_buf[2];    //acquisizione segnale d'errore
valoreattuale=rx_buf[1]; //acquisizione segnale riferimento
```

```
for (p=num-1;p>0;p--) {
    riferimento[p]=riferimento[p-1];}
riferimento[0]=valoreattuale;

    y=0;
for (p=0;p<=num-1;p++) {
    y=y+riferimento[p]*Q[p];} /*y = segnale riferimento at-
    traverso il filtro FIR principa-
    le*/

if (fabs(y>16000.0)) //evita la saturazione
    y=y*0.01;

    tx_buf[1]=y;
    rif1=0;

for (p=0;p<=num-1;p++) {
rif1=rif1+riferimento[p]*1000*S[p];} /*rif1 = segnale di
    riferimento filtrato dalla funzione di trasferimen-
    to*/
for (p=num-1;p>0;p--) {
    rif[p]=rif[p-1];}
rif[0]=rif1;

for (i=0;i<=num-1;i++) {
Q[i]=Q[i]+mu*rumore*rif[i];} //algoritmo LMS
}
}

/*****/
void setup_sports ( void )
{
    /* Configure SHARC serial port SPORT0 */

    /* Multichannel communications setup */
    sport0_iop.mtcs = 0x00070007; /* transmit on
words 0,1,2,16,17,18 */
    sport0_iop.mrcs = 0x00070007; /* receive on
words 0,1,2,16,17,18 */
    sport0_iop.mtccs = 0x00000000; /* no companding
on transmit */
    sport0_iop.mrccs = 0x00000000; /* no companding
on receive */
}
```

```
SetIOP(STCTL0, 0x001c00f2);
SetIOP(SRCTL0, 0x1f8c20f2);
    interrupt(SIG_SPT0I, spt0_asserted);

    /* Set up Transmit Transfer Control Block for chained
DMA */
    tx_tcb.ii = tx_buf;          /* DMA source buffer ad-
address */

    tx_tcb.cp = &tx_tcb.ii;     /* define ptr to next TCB
(point to self) */
    SetIOP(CP2, (((int)&tx_tcb.ii) & CP_MAF) | CP_PCI);
    /* define ptr to current TCB (kick off DMA) */
    /* (SPORT0 transmit uses DMA ch 2) */
    /* Set up Receive Transfer Control Block for chained
DMA */
    rx_tcb.ii = rx_buf;        /* DMA destination buffer
address */
    rx_tcb.cp = &rx_tcb.ii;     /* define ptr to next TCB
(point to self) */
    SetIOP(CP0, (((int)&rx_tcb.ii) & CP_MAF) | CP_PCI);
    /* define ptr to current TCB (kick off DMA) */
    /* (SPORT0 receive uses DMA ch 0) */
}

/*****/
void send_1847_config_cmds( void )
{
    // Set up pointer and counter to transmit commands.
    xmit_ptr = regs_1847;
    xmit_count = SZ_regs_1847;

    // Wait for all commands to be transmitted.
    while( xmit_count )
        idle();
    return;
}
/*****/
void init_21k( void )
{
    // Initialize pointer and counter to transmit commands.
    xmit_count = 0;
}
```

```
xmit_ptr = regs_1847;

// Enable interrupt nesting.
asm( "#include <def21060.h>" );
asm( "bit set model NESTM;" );

// Turn flag LEDs off.
set_flag( SET_FLAG2, SET_FLAG );

return;
}

/*****/
void main ( void )
{
    int i;
    int x;

    // Initialize some SHARC registers.
    init_21k();

    // Reset the Codec.
    set_flag( SET_FLAG0, CLR_FLAG );    /* Put CODEC into
RESET */

    for(x=0;x<0x000f;x++);
    set_flag( SET_FLAG0, SET_FLAG );    /* Release CODEC
from RESET */

    // Configure SHARC serial port.
    setup_sports();

    // Send setup commands to CODEC.
    send_1847_config_cmds();

    // Turn on all LEDs.
    set_flag(SET_FLAG2, CLR_FLAG);

    // Turn on the timer.
    // Disable timer and set rate to 4 Hz.
    timer_off();
    timer_set( 10000, 10000 );
    timer_on();
}
```

```
        y=0.0;

for(i=0;i<=num-1;i++) { S[i]=0;}
for(i=0;i<=num-1;i++) { riferimento[i]=0;}
for(i=0;i<=num-1;i++) { rif[i]=0;}
for(i=0;i<=num-1;i++) { Q[i]=0;}
        interrupt(SIG_TMZ0, timer_hi_prior);
        // Loop forever.
        for(;;)
        {
                idle();
        };
}
```


4. Verifiche sperimentali sul prototipo di marmitta elettronica per motore a quattro tempi ed ottimizzazioni

4.1 Verifiche sperimentali

La marmitta elettronica per motori a 4 tempi è stata installata su un'autovettura modello FIAT Marea SW 1900cc JTD, come mostrato nella foto di figura 28.

La marmitta elettronica ed il sistema di controllo sono stati collegati allo scopo di calibrare, tarare l'intero sistema e verificarne le prestazioni.

A tale proposito è stata condotta una campagna di misure fonometriche nelle vicinanze della sezione terminale della marmitta elettronica.

Le misure sono state effettuate in condizioni di sistema di controllo attivo acceso e sistema di controllo spento, in modo da valutare la riduzione di livello di rumore introdotto dal sistema di controllo.

Una prima serie di misure (vedere paragrafo 4.4) è stata effettuata per una velocità di rotazione del motore pari a 2000 rpm.

Una seconda serie di misure (vedere paragrafo 4.6) è stata, invece, condotta per una velocità di rotazione del motore pari a 3000 rpm.



Fig. 28: marmitta elettronica installata sull'autovettura

4.2 Strumentazione fonometrica

Il fonometro utilizzato è l'Investigator modello 2260 prodotto dalla Bruel & Kjaer avente le seguenti caratteristiche:

- conformità alle norme IEC651 (1979), IEC1260 (1995), ANSI S1.4 (1983) e ANSI S1.11 (1986);
- conformità agli standard ISO, DIN, BS, NBE, SS, Sia, ONORM, NF, UNI, ASTM e NEN;
- equipaggiato con microfono a condensatore prepolarizzato tipo 4189, sensibilità nominale $-26 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$ riferito a 1 V/Pa , capacità 14 pF (a 250 Hz);
- i filtri in banda d'ottava ed in terzi d'ottava sono conformi all'IEC 1260 (1995) e all'ANSI S1.11-1986

- livello di rumore “inherent” (combinazione tra rumore elettrico e rumore termico a 20°C) sono 2 dB a 1KHz, 8 dB a 10 KHz (bande in terzo d’ottava) e 6 dB a 1KHz, 12 dB a 8 KHz (bande d’ottava);
- dinamica di misura è pari a 90 dB (bande d’ottava ed in terzo d’ottava) e a 80 dB (ponderato A).

4.3 Modalità di misura

La campagna di misure fonometriche è stata condotta posizionando il microfono del fonometro nei seguenti punti di misura (vedere figura 29):

- Punto A - a 50 cm dall’uscita della marmitta elettronica e lungo il suo asse centrale;
- Punto B - a 50 cm dall’uscita della marmitta elettronica e a 45° a sinistra dal suo asse centrale;
- Punto C - a 50 cm dall’uscita della marmitta elettronica e a 45° a destra dal suo asse centrale;
- Punto D - ad 1 m dall’uscita della marmitta elettronica e lungo il suo asse centrale;
- Punto E - ad 1 m dall’uscita della marmitta elettronica e a 45° a sinistra dal suo asse centrale;
- Punto F - ad 1 m dall’uscita della marmitta elettronica e a 45° a destra dal suo asse centrale;
- Punto G - a 2 m dall’uscita della marmitta elettronica e lungo il suo

asse centrale;

- Punto H - a 2 m dall'uscita della marmitta elettronica e a 45° a sinistra dal suo asse centrale;
- Punto I - a 2 m dall'uscita della marmitta elettronica e a 45° a destra dal suo asse centrale;
- Punto L - a 5 m dall'uscita della marmitta elettronica e lungo il suo asse centrale;
- Punto M - a 5 m dall'uscita della marmitta elettronica e a 45° a sinistra dal suo asse centrale;
- Punto N - a 5 m dall'uscita della marmitta elettronica e a 45° a destra dal suo asse centrale.

Le misure suddette sono state effettuate posizionando il microfono del fonometro ad un'altezza di 35 cm da terra; in riferimento alla norma ISO 5130 del 1982, sono state eseguite due misure posizionando il microfono del fonometro a 50 cm dall'uscita della marmitta elettronica e a 45° dal suo asse centrale (punti B e C di figura 29).

Sono state effettuate le misure per un periodo di 10 s all'interno del quale è stato valutato il livello equivalente continuo lineare e quello ponderato A del rumore prodotto in uscita alla marmitta elettronica; inoltre, è stato analizzato lo spettro del rumore valutando il Leq per ciascuna banda in terzi d'ottava.

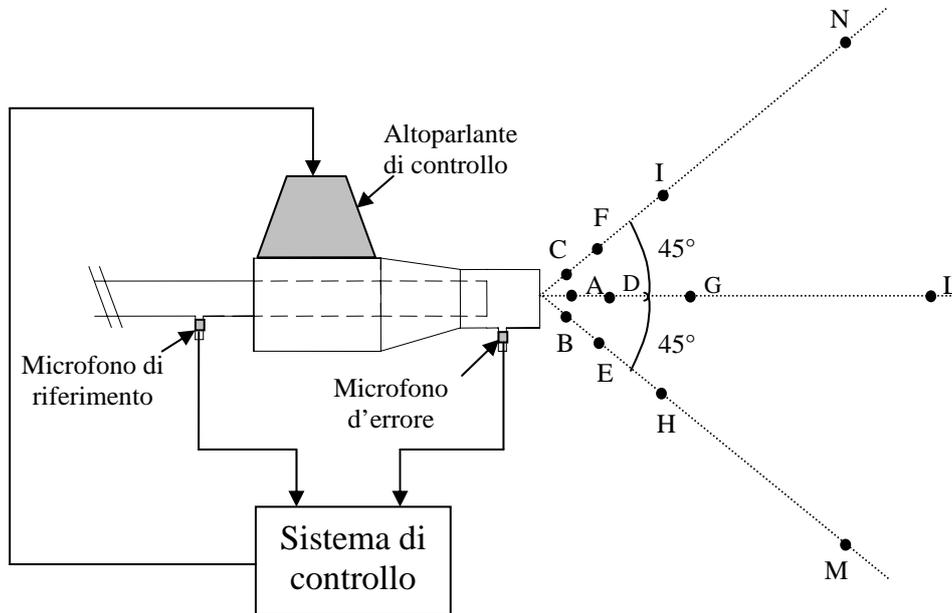


Fig. 29: *posizione dei punti di misura*

Per limitare il contributo di rumore proveniente dal motore, la parte anteriore dell'autovettura è stata rivestita con pannelli fonoassorbenti.

4.4 Prima serie di misure

La prima serie di misure è stata condotta come mostrato in figura 29: il segnale di riferimento, prelevato mediante un opportuno microfono, è stato inviato in ingresso all'unità di controllo; in questo modo il DSP dispone di un segnale ben sincronizzato con il segnale di errore, rilevato mediante un microfono posto a valle della marmitta elettronica. E' stato

osservato che è possibile ottenere un buon sincronismo anche utilizzando, come riferimento, il segnale prelevato mediante un accelerometro posto a contatto con il corpo motore dell'autovettura in modo tale da vibrare solidalmente al motore stesso. Non risulta invece correlato il segnale acustico del rumore con quello della candela, pertanto quest'ultima non può essere impiegata come riferimento nell'unità di controllo.

L'uscita del DSP, che genera il segnale di antirumore, è stata inviata all'altoparlante di controllo, alloggiato nel corpo della marmitta elettronica.

La prima serie di misure è stata effettuata per un regime di rotazione del motore pari a 2000 rpm, in condizioni di sistema di controllo attivo acceso e sistema di controllo spento, in modo da valutare la riduzione di livello di rumore introdotto dal sistema di controllo.

In tabella 6 sono riportati i valori medi del LAeq e del LLeq per ciascuna misura effettuata in condizioni di sistema di controllo attivo acceso e di sistema di controllo spento; sono inoltre riportate le riduzioni ottenute del LAeq e del LLeq.

In tabella 7 sono riportati i valori del LLeq relativi alla componente principale (80 Hz) per ciascun punto di misura in presenza e assenza del segnale di controllo e le riduzioni ottenute.

Nelle figure 30, 31, ..., 53 sono rappresentati gli spettri medi del LLeq per ciascuna misura effettuata.

Tabella 6: livelli di rumore nei punti di misura: confronto fra sistema di controllo attivo acceso e spento

Punto di misura	LLeq con controllo (dB)	LLeq senza controllo (dB)	LAeq con controllo (dBA)	LAeq Senza Controllo (dBA)	Riduzione LLeq ottenuta (dB)	Riduzione LAeq ottenuta (dBA)
A	82.2	92.2	70.0	74.3	-10.0	-4.3
B	79.0	90.3	69.1	72.9	-11.3	-3.8
C	83.2	91.6	69.3	75.1	-8.4	-5.8
D	76.7	85.2	68.6	71.4	-8.5	-2.8
E	77.2	85.3	62.1	66.7	-8.1	-4.6
F	79.2	89.1	70.7	74.1	-9.9	-3.4
G	73.1	84.2	67.9	70.8	-11.1	-2.9
H	73.0	83.7	64.7	68.9	-10.7	-4.2
I	78.7	88.5	69.9	73.8	-9.8	-3.9
L	67.9	77.6	63.4	67.4	-9.6	-4.0
M	71.3	79.6	60.1	65.2	-8.3	-5.1
N	70.3	79.2	66.0	69.8	-8.9	-3.8

Tabella 7: livelli di rumore della componente principale ($f_c=80$ Hz) nei punti di misura: confronto fra sistema di controllo attivo acceso e spento

Punto di misura	LLeq della componente principale (80 Hz) con controllo (dB)	LLeq della componente principale (80 Hz) senza controllo (dB)	Riduzione LLeq ottenuta (dB)
A	75.2	90.4	-15.2
B	75.8	89.5	-13.7
C	74.7	88.3	-13.6
D	69.4	83.2	-13.8
E	60.4	72.7	-12.3
F	69.6	85.4	-15.8
G	65.4	83.0	-17.6
H	66.4	82.2	-15.8
I	66.5	85.2	-18.6
L	57.2	75.3	-18.1
M	57.3	76.5	-19.2
N	56.1	75.6	-19.5

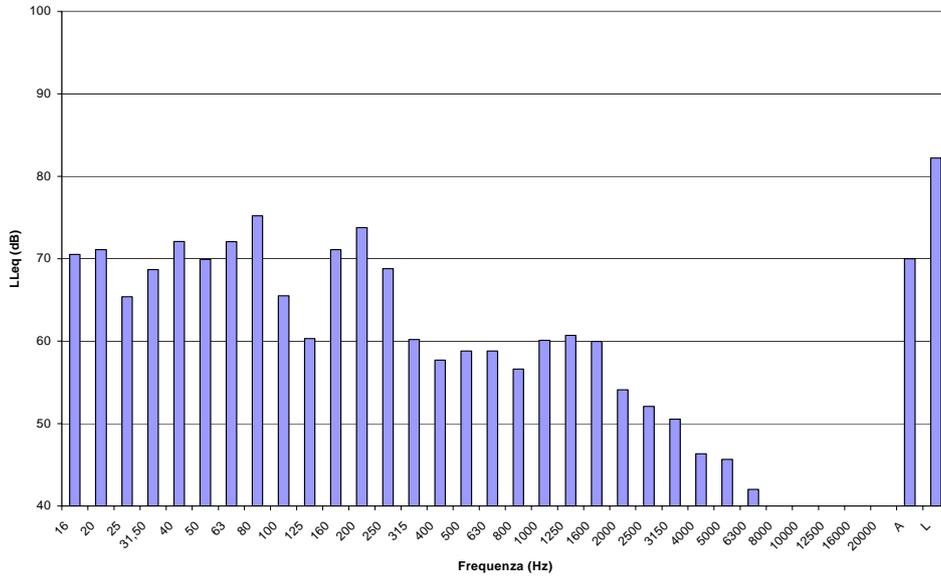


Fig. 30: spettro del LLeq nel punto A con controllo acceso

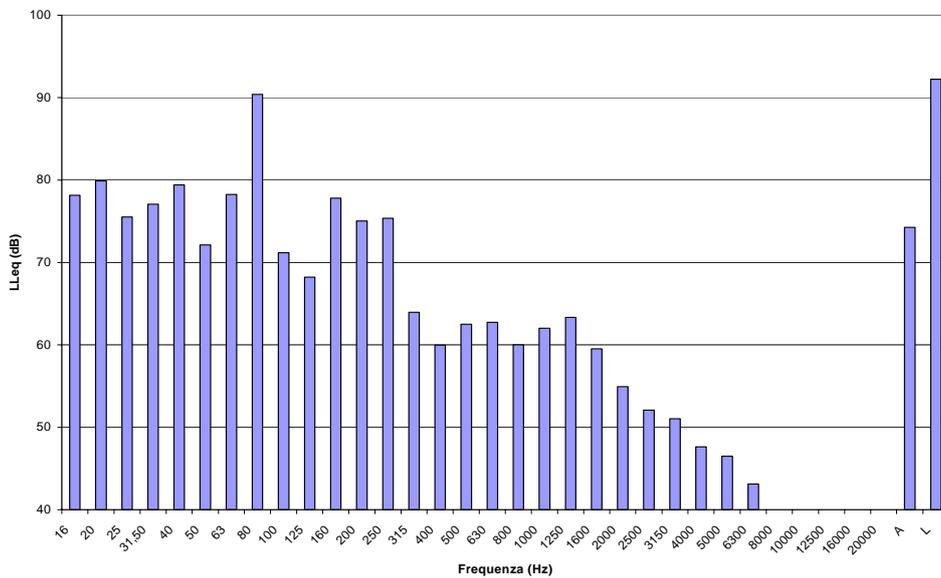


Fig. 31: spettro del LLeq nel punto A con controllo spento

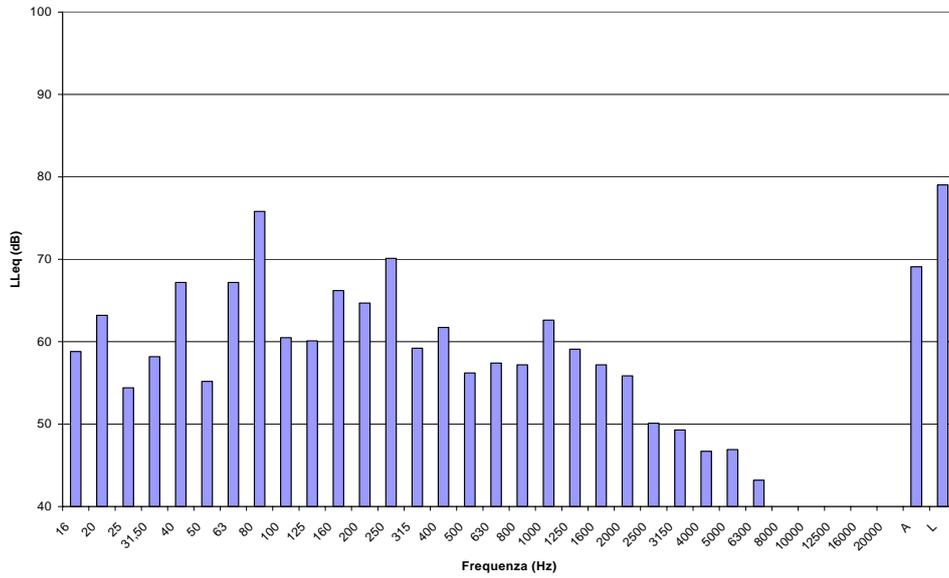


Fig. 32: spettro del LLeq nel punto B con controllo acceso

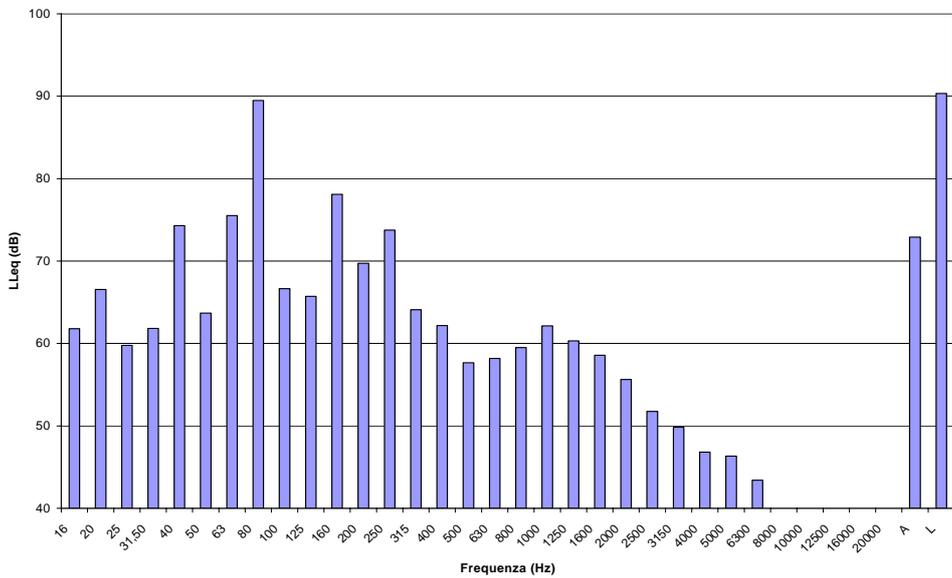


Fig. 33: spettro del LLeq nel punto B con controllo spento

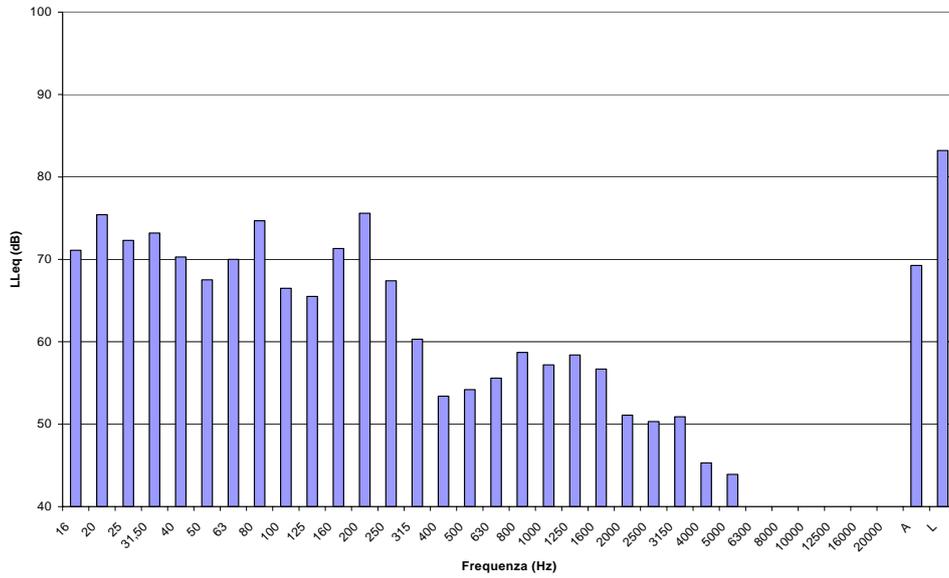


Fig. 34: spettro del LLeq nel punto C con controllo acceso

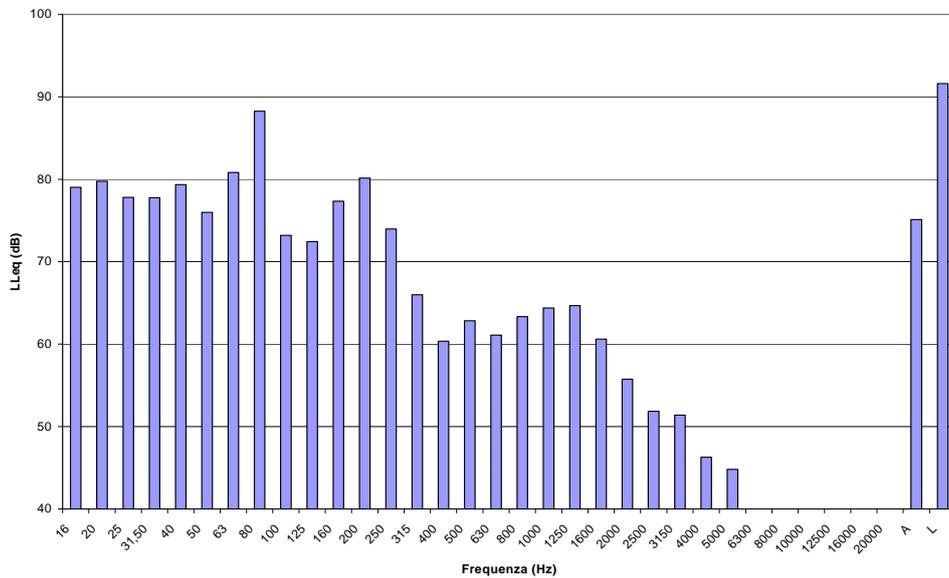


Fig. 35: spettro del LLeq nel punto C con controllo spento

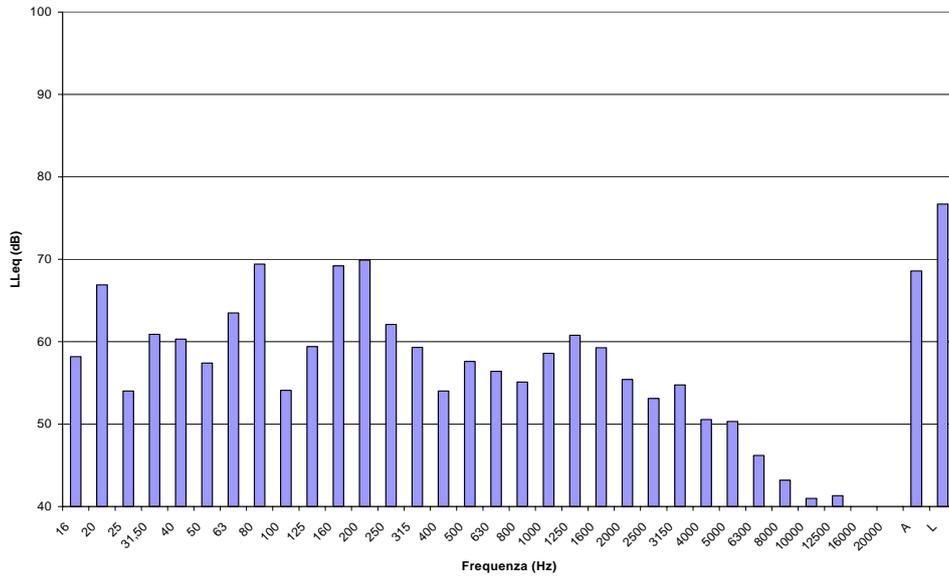


Fig. 36: spettro del LLeq nel punto D con controllo acceso

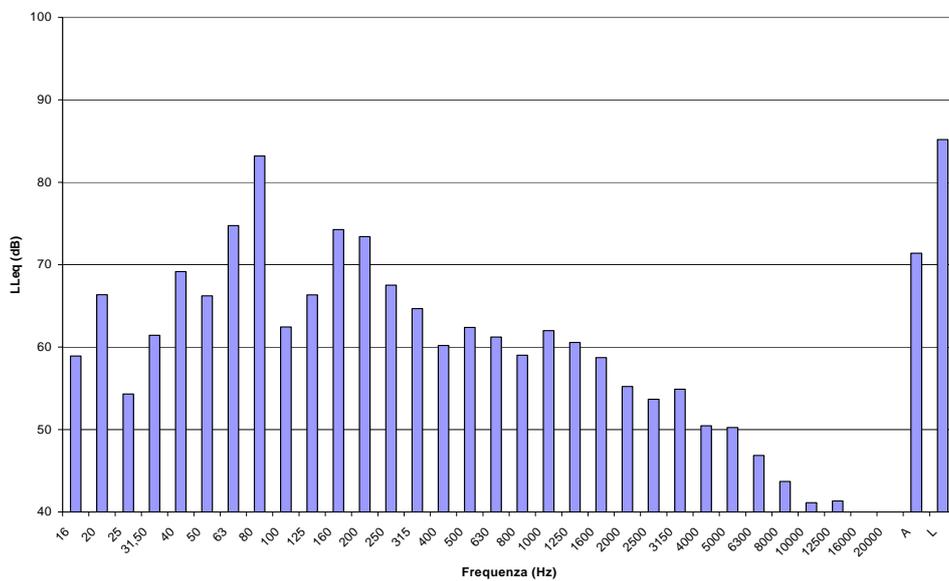


Fig. 37: spettro del LLeq nel punto D con controllo spento

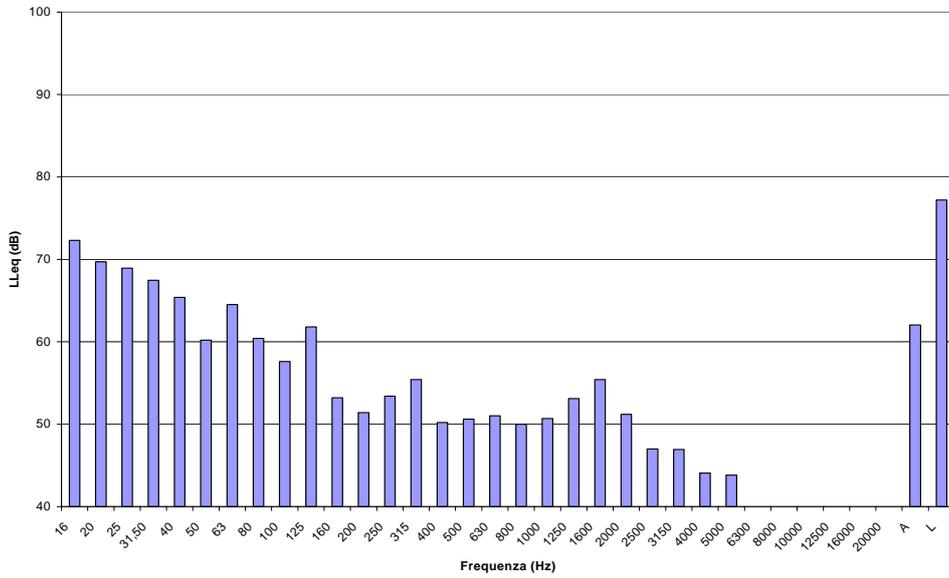


Fig. 38: spettro del LLeq nel punto E con controllo acceso

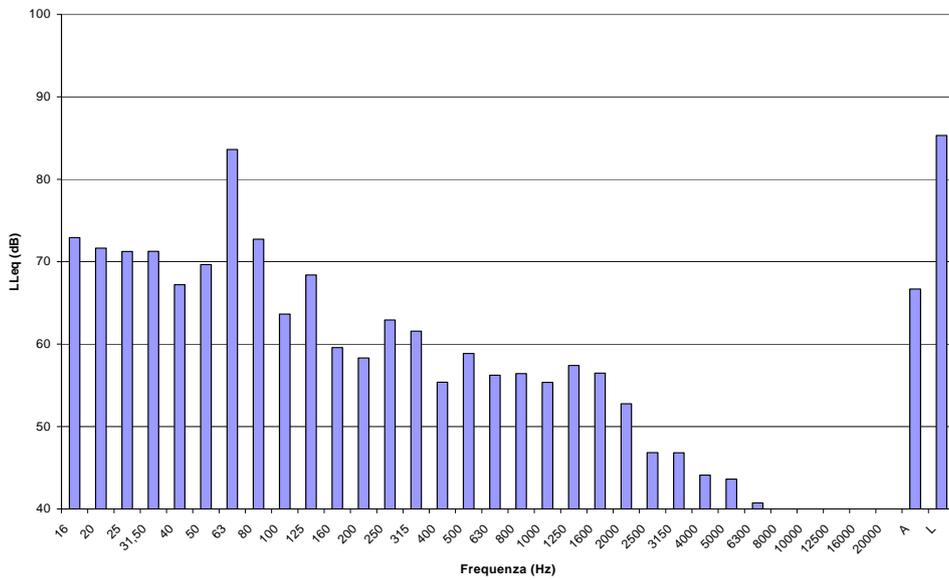


Fig. 39: spettro del LLeq nel punto E con controllo spento

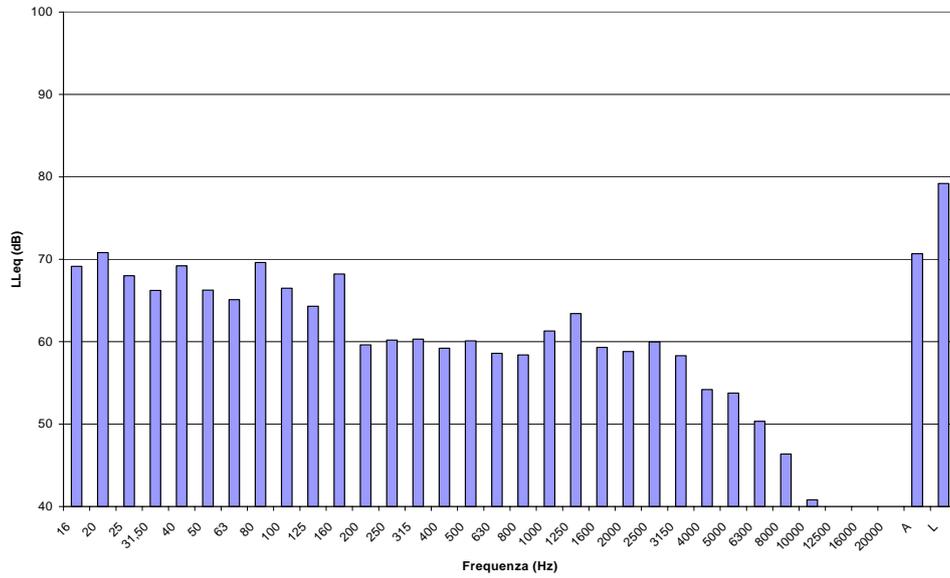


Fig. 40: spettro del LLeq nel punto F con controllo acceso

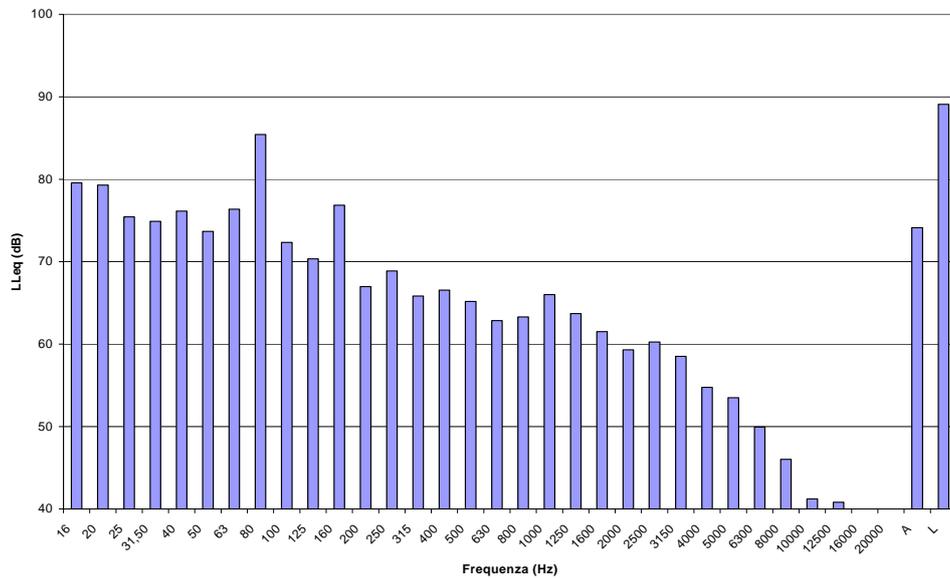


Fig. 41: spettro del LLeq nel punto F con controllo spento

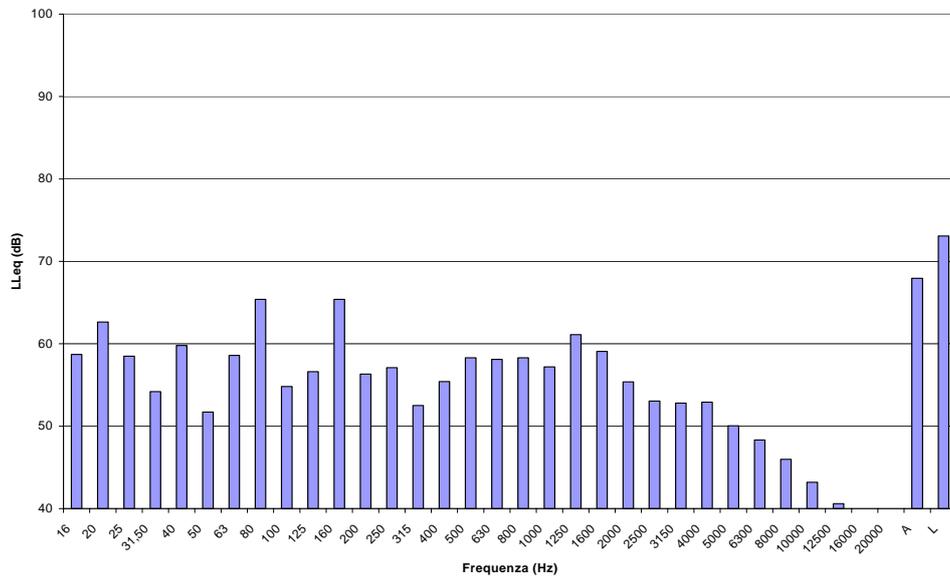


Fig. 42: spettro del LLeq nel punto G con controllo acceso

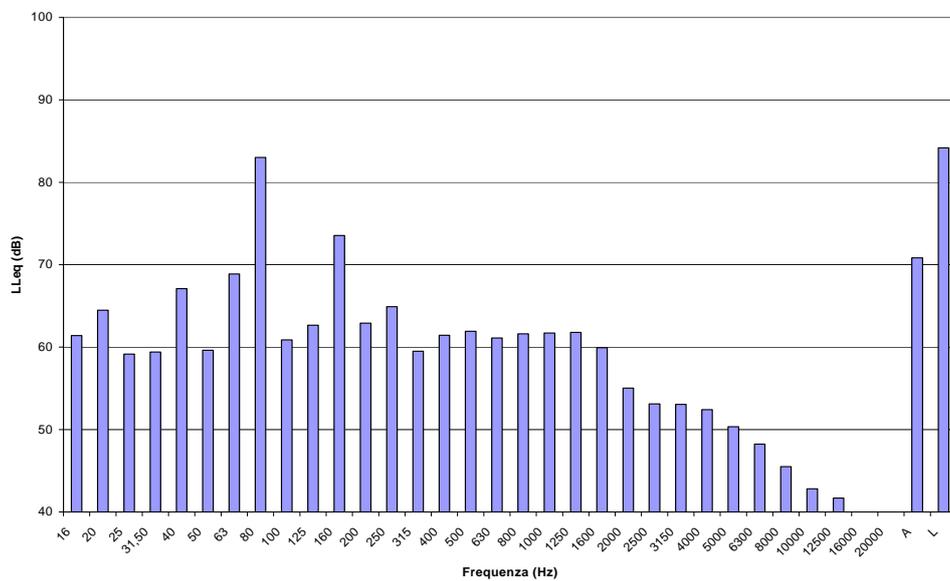


Fig. 43: spettro del LLeq nel punto G con controllo spento

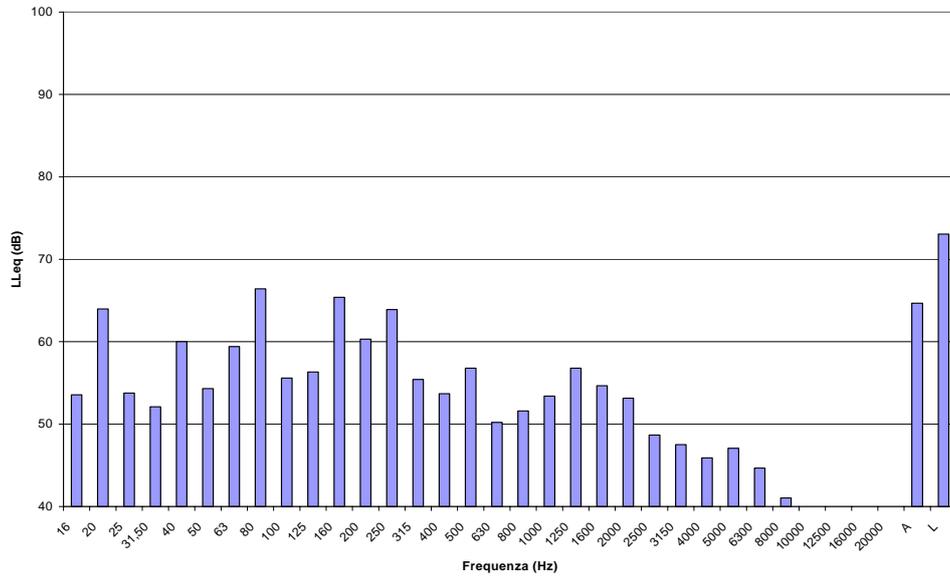


Fig. 44: spettro del LLeq nel punto H con controllo acceso

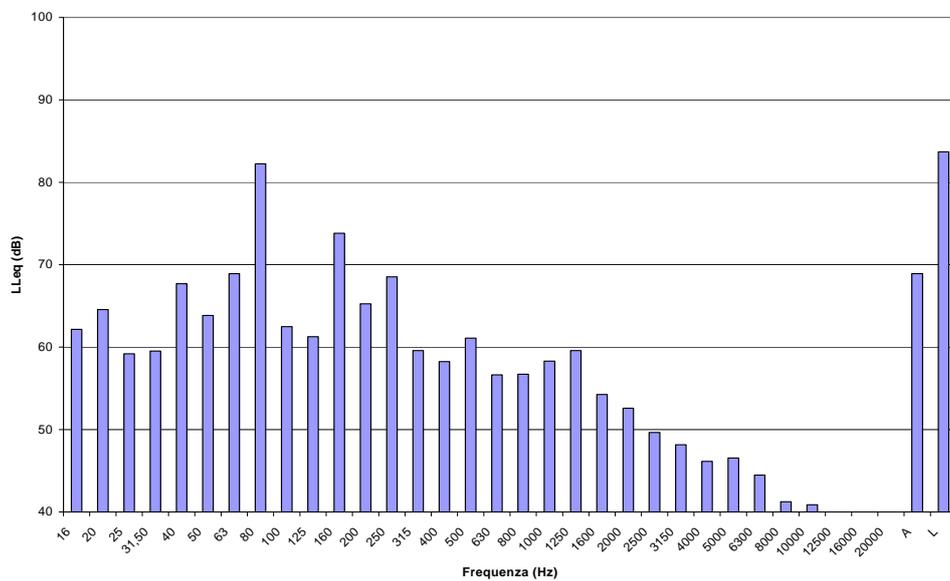


Fig. 45: spettro del LLeq nel punto H con controllo spento

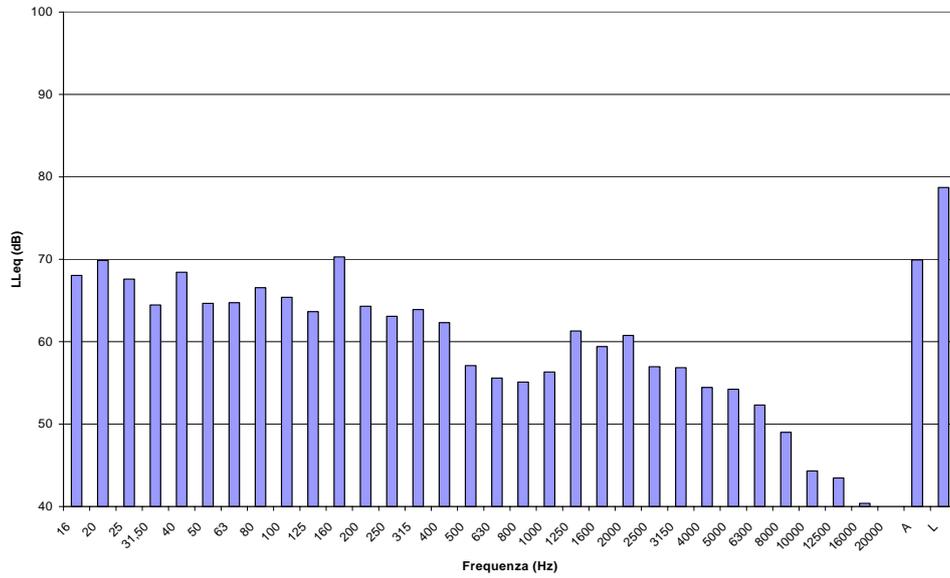


Fig. 46: spettro del LLeq nel punto I con controllo acceso

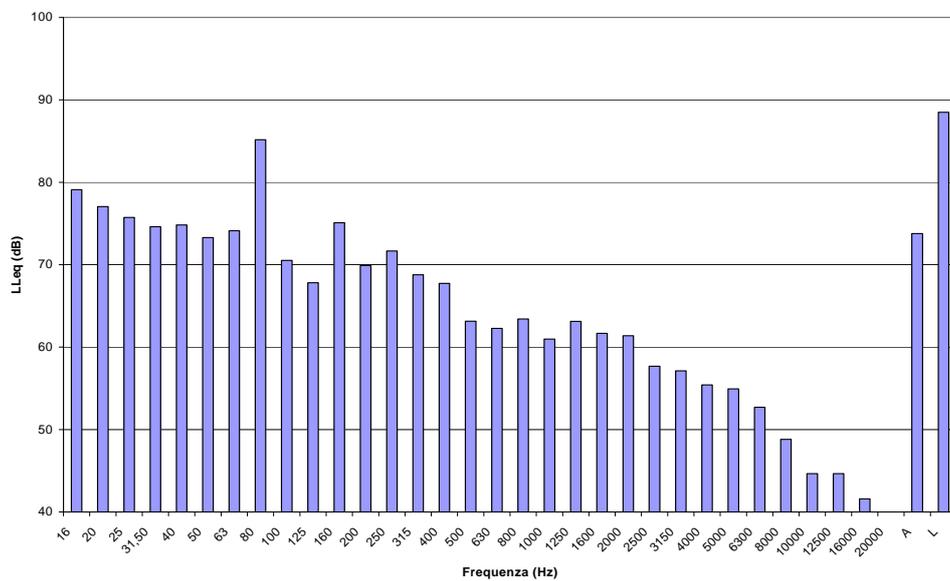


Fig. 47: spettro del LLeq nel punto I con controllo spento

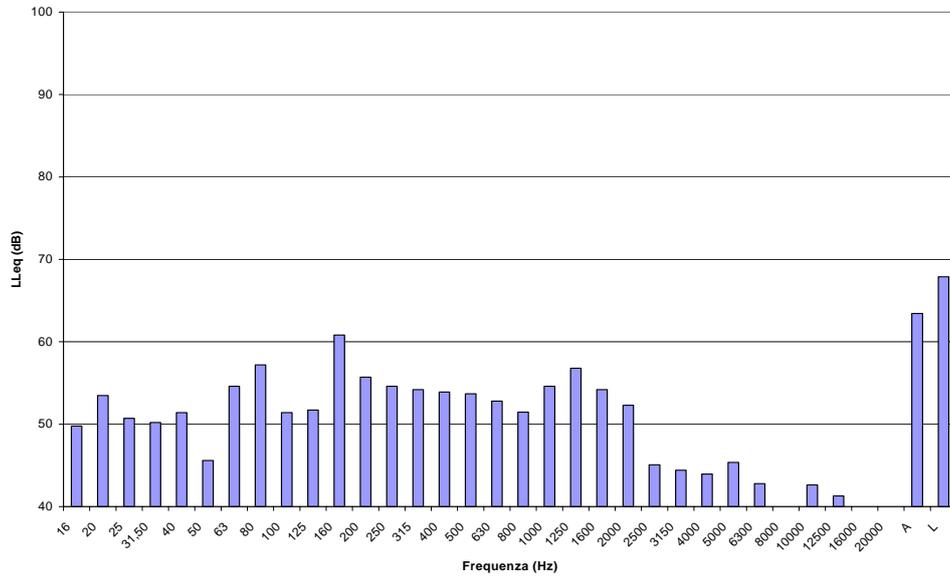


Fig. 48: spettro del LLeq nel punto L con controllo acceso

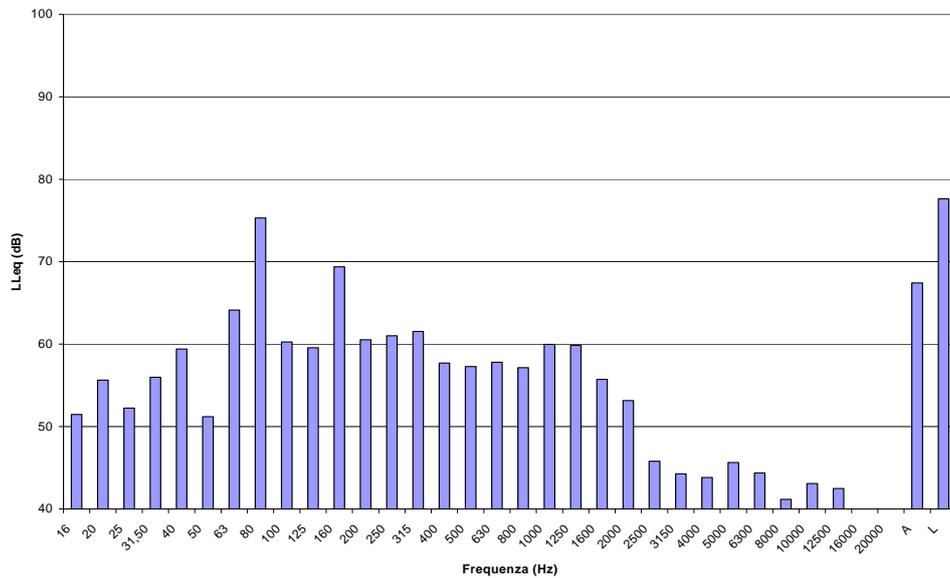


Fig. 49: spettro del LLeq nel punto L con controllo spento

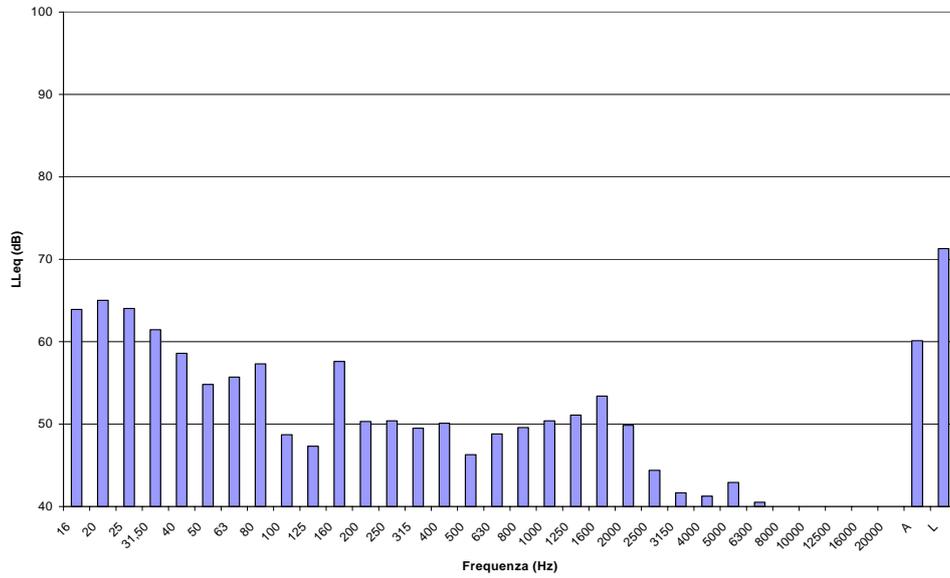


Fig. 50: spettro del LLeq nel punto M con controllo acceso

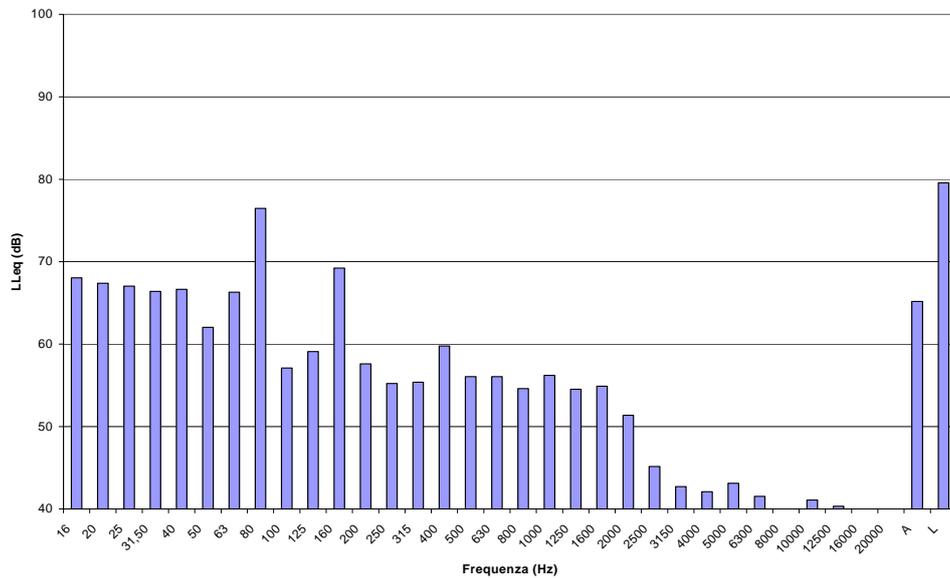


Fig. 51: spettro del LLeq nel punto M con controllo spento

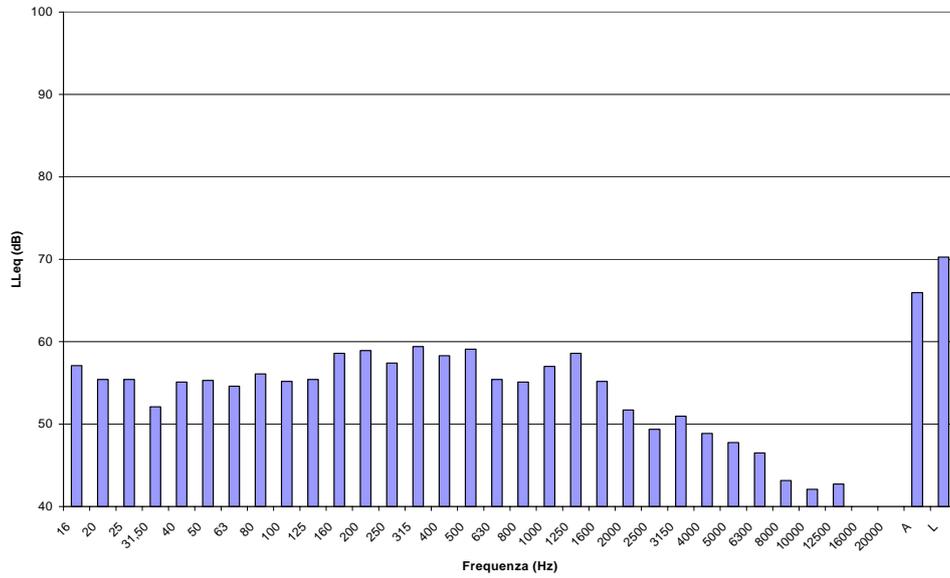


Fig. 52: spettro del LLeq nel punto N con controllo acceso

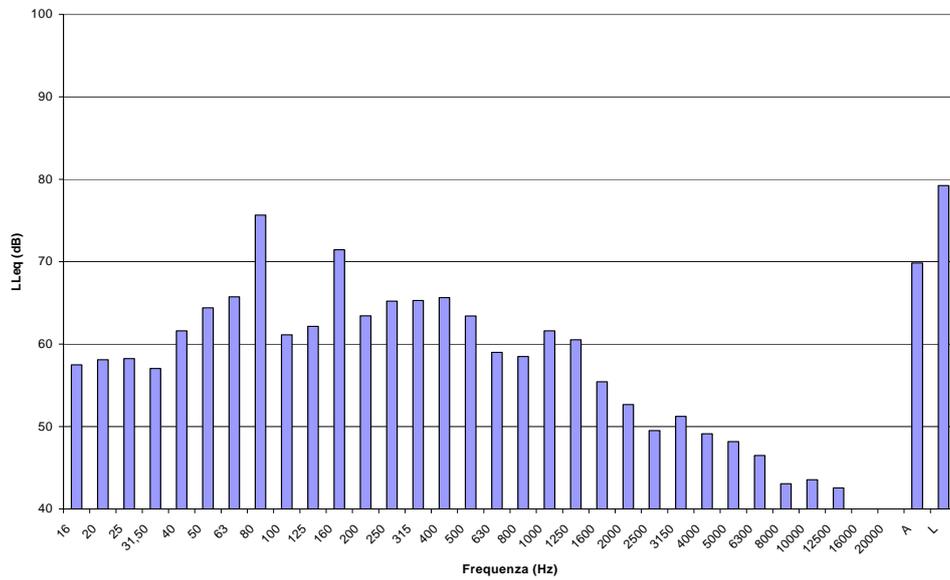


Fig. 53: spettro del LLeq nel punto N con controllo spento

4.5 Commenti ai risultati della prima serie di misure

Analizzando gli spettri in bande in terzi di ottava ottenuti in condizioni di controllo attivo acceso e spento, si nota come, nella componente principale (80 Hz), il sistema di controllo permetta di ridurre, in media, di circa 16 dB il LLeq rispetto al caso senza controllo. Tale riduzione, come riportato in tabella 7 è massima in corrispondenza del punto N (19.5 dB) e minima nel punto E (12.3 dB); si può inoltre osservare che la riduzione del LLeq aumenta al crescere della distanza dall'uscita della marmitta elettronica, fino ad arrivare a 18 – 19 dB nei punti L, M e N posizionati ad una distanza di 5 m. Tale circostanza è dovuta al fatto che le componenti alle basse frequenze si propagano in aria in modo più efficace di quelle ad alta frequenza, determinando così valori delle radiazioni crescenti all'aumentare della distanza dall'uscita del condotto di scarico.

Dall'analisi dei risultati riportati in tabella 6, si osserva che, considerando tutte le componenti spettrali del rumore in uscita dalla marmitta elettronica, la riduzione del LLeq ottenuta è, in media, pari a 9.5 dB e varia da un minimo di 8.1 dB, misurato nel punto E, ad un massimo di 11.3 dB, rilevato nel punto B. La riduzione ottenuta del livello equivalente ponderato A risulta significativamente minore rispetto a quella del livello lineare poiché il sistema di controllo agisce soprattutto sulle basse frequenze, che assumono scarsa rilevanza quando lo spettro del rumore è filtrato dalla curva di ponderazione A. Il LAeq è ridotto, in media, di 4 dBA; tale riduzione varia da un minimo di 2.8 dBA, misurato nel punto D, ad un massimo di 5.8 dBA, rilevato nel punto C.

A frequenze superiori ai 1000 Hz, l'algoritmo di controllo mostra

risultati modesti che sono da imputare al fatto che il DSP non è in grado di inseguire fedelmente le rapide variazioni del segnale d'ingresso; ad alte frequenze è comunque possibile ridurre facilmente l'entità del rumore prodotto attraverso metodi di tipo passivo.

4.6 Seconda serie di misure

La seconda serie di misure, analogamente alla prima, è stata condotta con la strumentazione e le modalità indicate nei paragrafi 4.2 e 4.3.

Il segnale di riferimento, prelevato mediante un opportuno microfono, è stato inviato in ingresso all'unità di controllo; in questo modo il DSP dispone di un segnale ben sincronizzato con il segnale di errore, rilevato anch'esso mediante un microfono. L'uscita del DSP è stata inviata all'altoparlante di controllo, alloggiato nel corpo della marmitta elettronica. La seconda serie di misure è stata effettuata per un regime di rotazione del motore pari a 3000 rpm, in condizioni di sistema di controllo attivo acceso e sistema di controllo spento, in modo da valutare la riduzione di livello di rumore introdotto dal sistema di controllo.

In tabella 8 sono riportati i valori medi del LAeq e del LLeq per ciascuna misura effettuata in condizioni di sistema di controllo attivo acceso e di sistema di controllo spento; sono inoltre riportate le riduzioni ottenute del LAeq e del LLeq. In tabella 9 sono riportati i valori del LLeq relativi alla componente principale (100 Hz) per ciascun punto di misura in presenza e assenza del segnale di controllo e le riduzioni ottenute.

Tabella 8: livelli di rumore nei punti di misura: confronto fra sistema di controllo attivo acceso e spento

Punto di misura	LLeq con controllo (dB)	LLeq senza Controllo (dB)	LAeq con controllo (dBA)	LAeq Senza Controllo (dBA)	Riduzione LLeq ottenuta (dB)	Riduzione LAeq ottenuta (dBA)
A	88.8	97.4	74.1	79.1	-8.6	-5.0
B	84.1	95.7	75.0	79.7	-11.6	-4.7
C	82.1	92.4	74.9	79.1	-10.3	-4.2
D	87.5	95.4	73.3	81.3	-7.9	-8.0
E	77.2	87.9	71.7	75.8	-10.7	-4.1
F	81.6	90.8	75.4	79.4	-9.2	-4.0
G	78.8	86.5	72.3	76.7	-7.7	-4.4
H	78.6	88.8	69.0	74.3	-10.2	-5.3
I	76.3	85.6	73.6	77.7	-9.3	-4.1
L	70.4	80.7	67.8	72.6	-10.3	-4.8
M	69.3	77.5	66.2	71.0	-8.2	-4.8
N	70.4	78.9	68.9	74.1	-8.5	-5.2

Tabella 9: livelli di rumore della componente principale ($f_c=100$ Hz) nei punti di misura: confronto fra sistema di controllo attivo acceso e spento

Punto di misura	LLeq della componente principale (80 Hz) con controllo (dB)	LLeq della componente principale (80 Hz) senza controllo (dB)	Riduzione LLeq ottenuta (dB)
A	72.3	91.6	-19.3
B	81.2	95.3	-14.1
C	77.4	91.5	-14.1
D	71.2	89.6	-18.4
E	72.3	87.0	-14.7
F	72.1	87.9	-15.8
G	63.4	81.2	-17.8
H	70.5	87.9	-17.4
I	65.6	83.5	-17.9
L	59.6	78.9	-19.3
M	52.3	71.7	-19.4
N	55.0	73.4	-18.4

Nelle figure 54, 55,, 77 sono rappresentati gli spettri medi del LLeq per ciascuna misura effettuata.

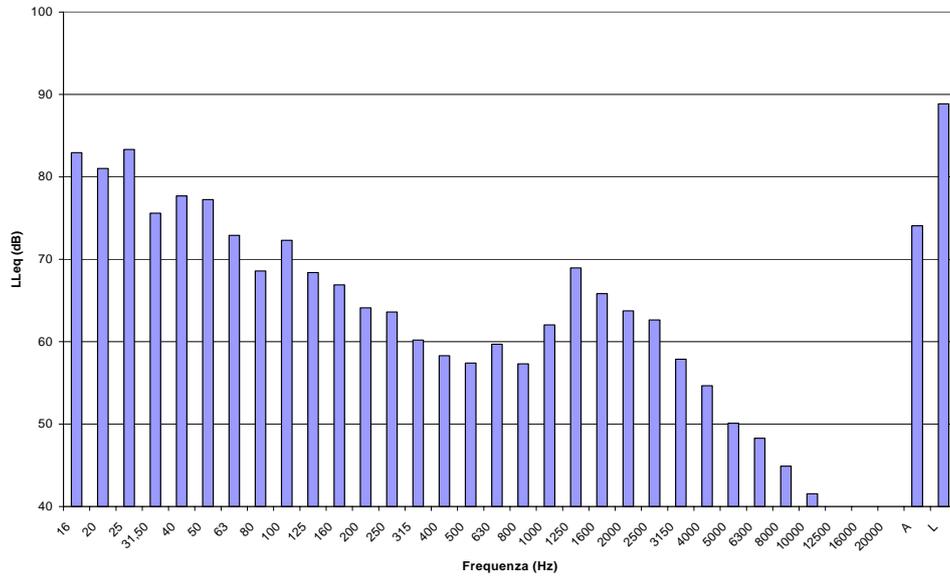


Fig. 54: spettro del LLeq nel punto A con controllo acceso

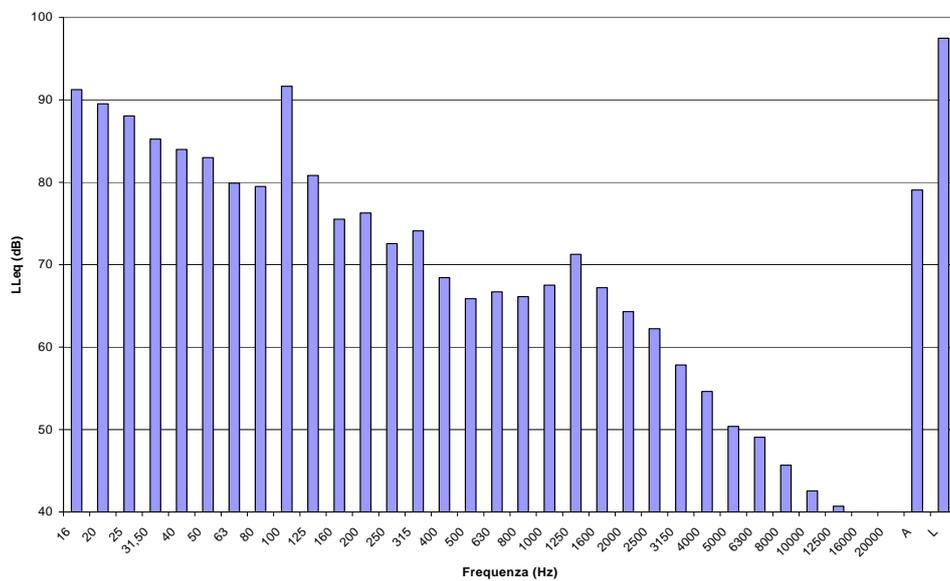


Fig. 55: spettro del LLeq nel punto A con controllo spento

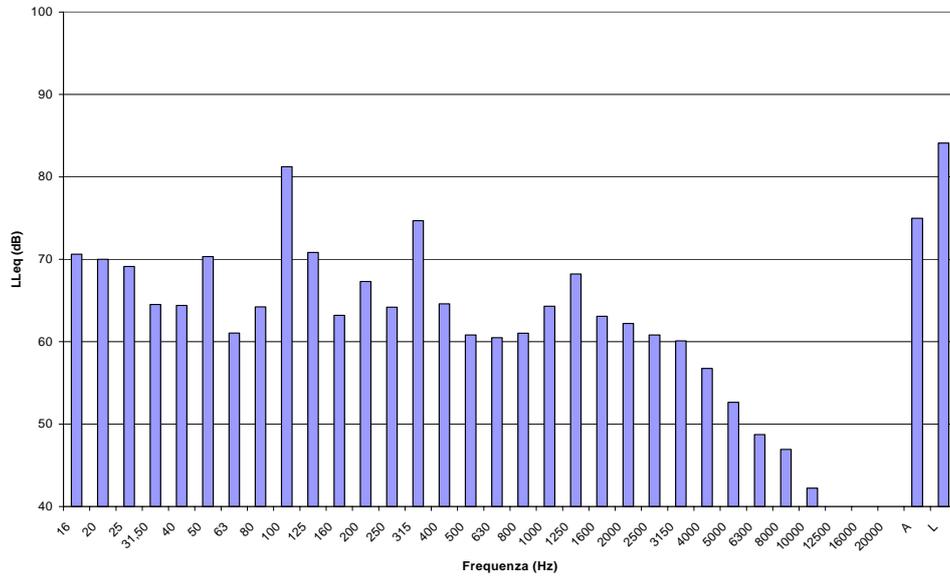


Fig. 56: spettro del LLeq nel punto B con controllo acceso

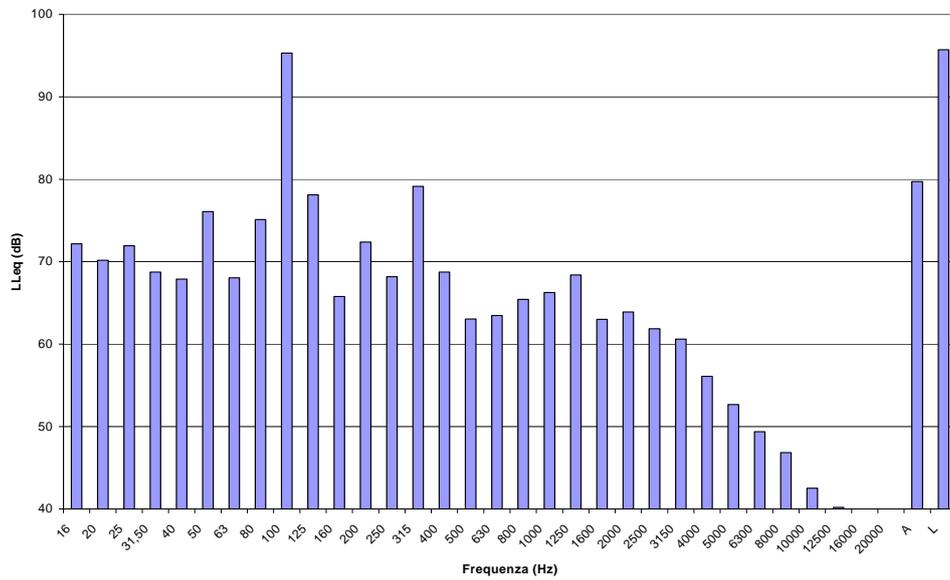


Fig. 57: spettro del LLeq nel punto B con controllo spento

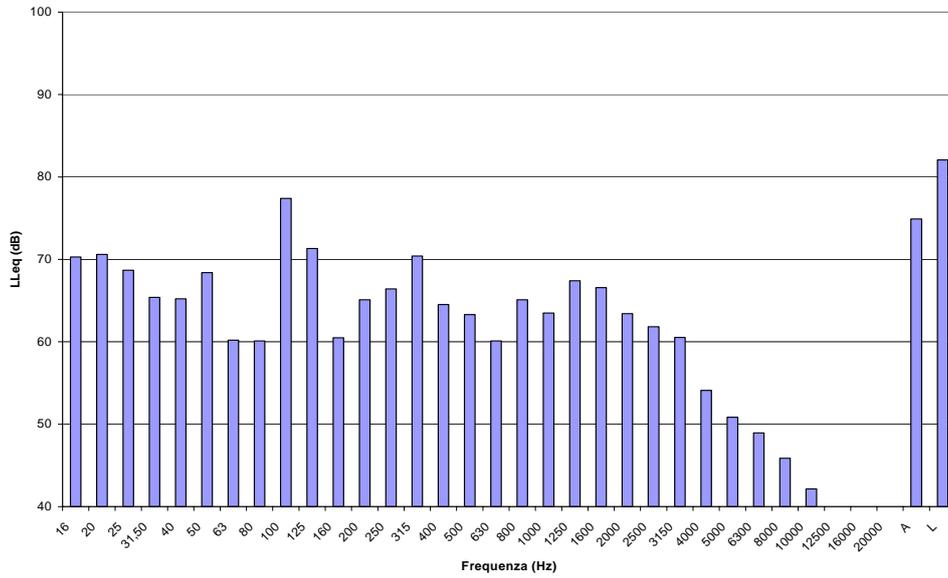


Fig. 58: spettro del LLeq nel punto C con controllo acceso

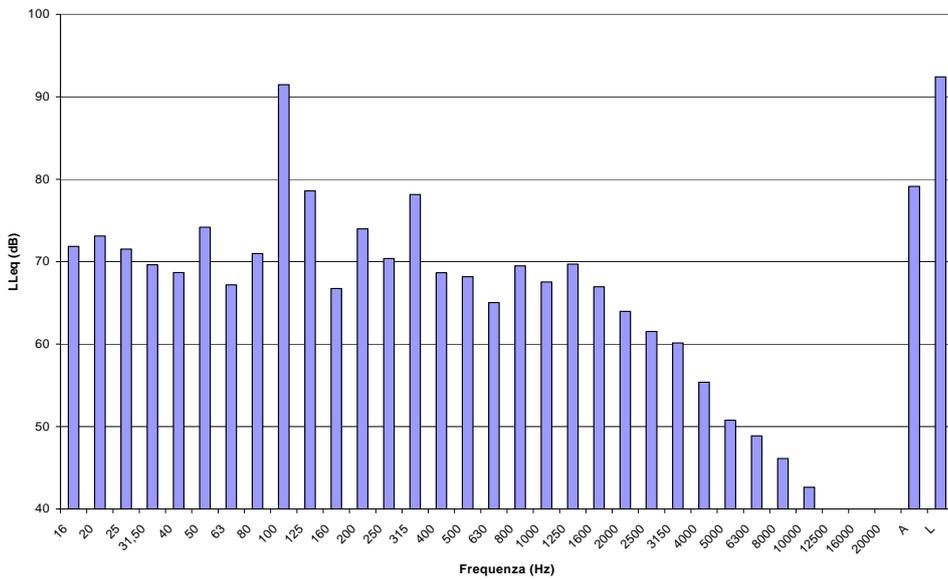


Fig. 59: spettro del LLeq nel punto C con controllo spento

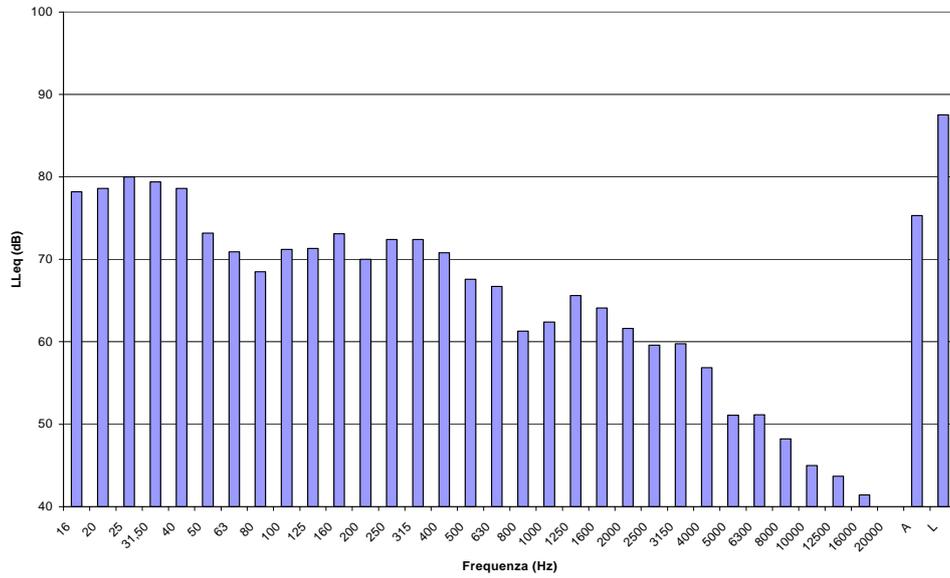


Fig. 60: spettro del LLeq nel punto D con controllo acceso

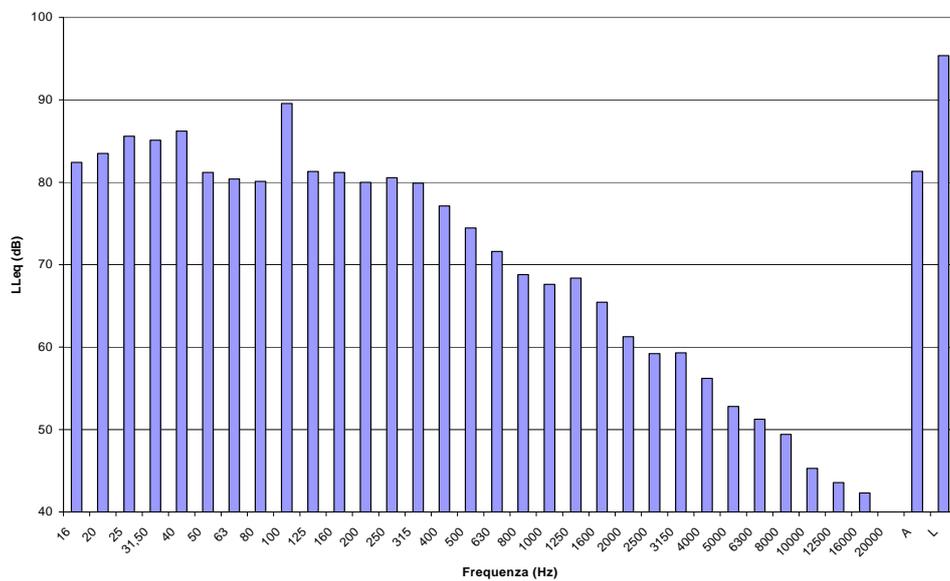


Fig. 61: spettro del LLeq nel punto D con controllo spento

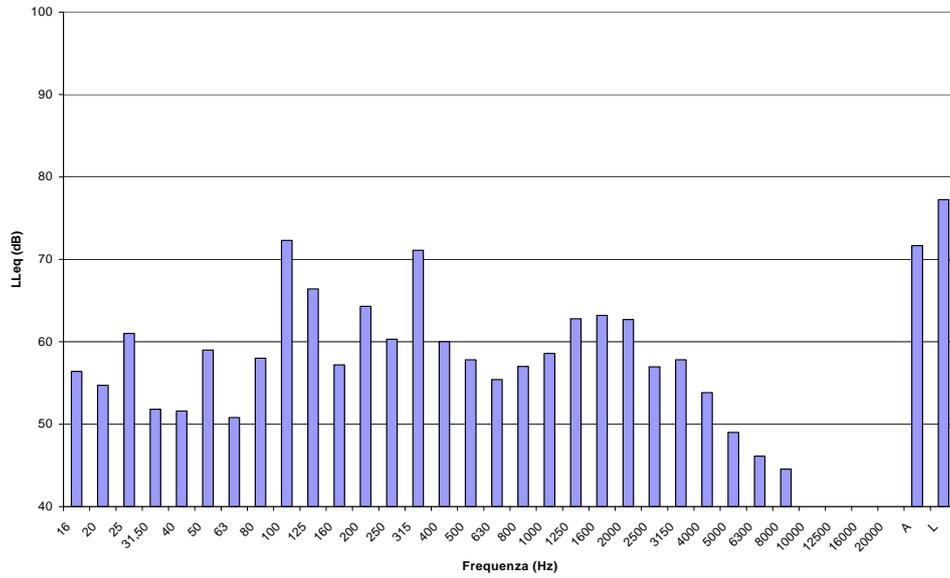


Fig. 62: spettro del LLeq nel punto E con controllo acceso

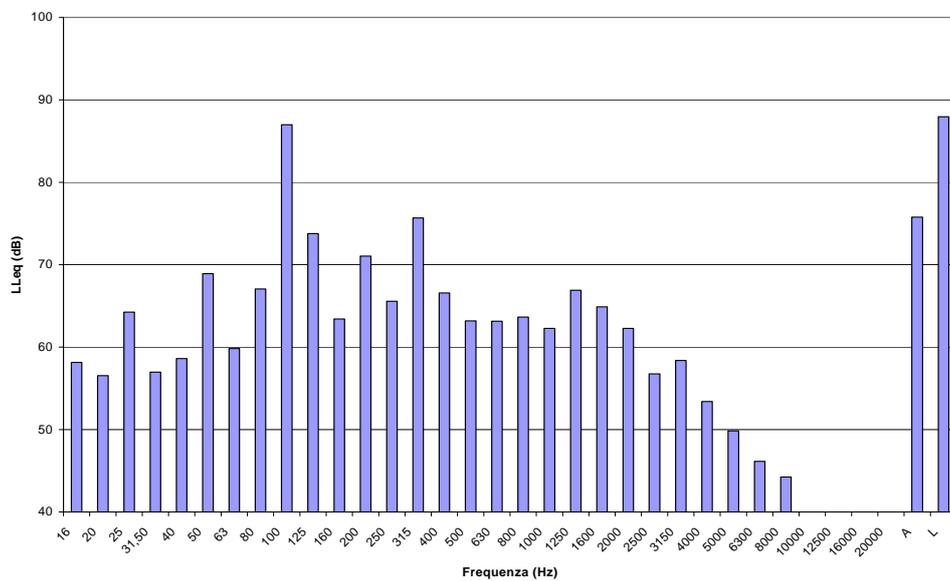


Fig. 63: spettro del LLeq nel punto E con controllo spento

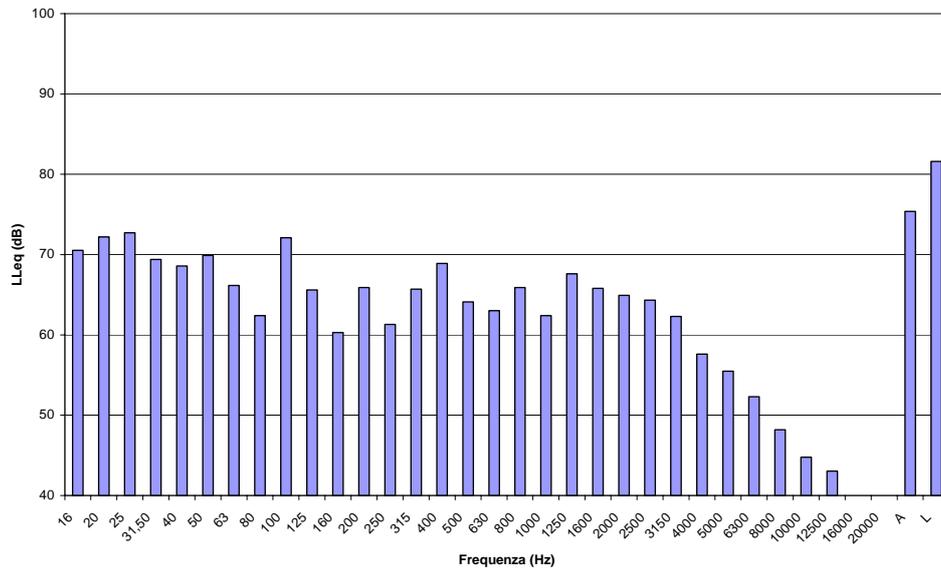


Fig. 64: spettro del LLeq nel punto F con controllo acceso

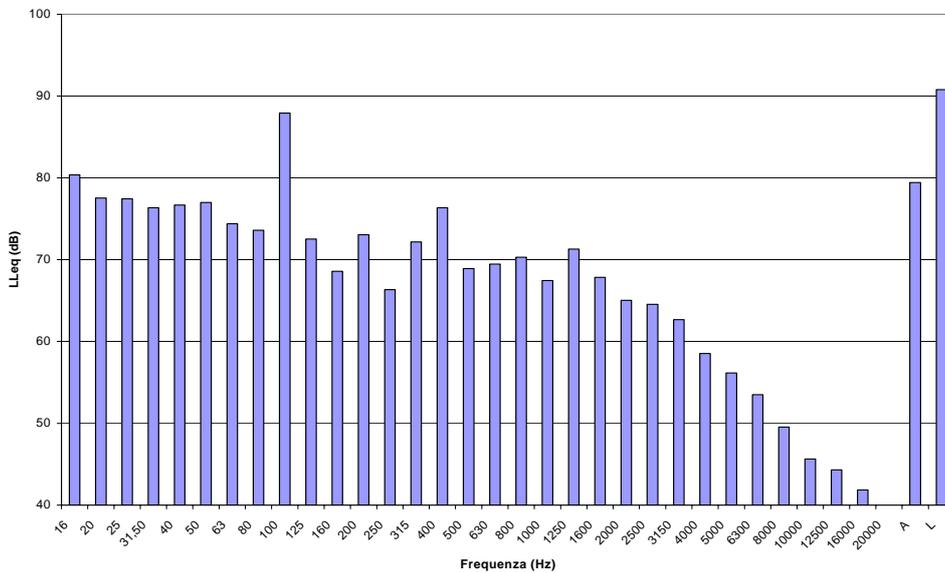


Fig. 65: spettro del LLeq nel punto F con controllo spento

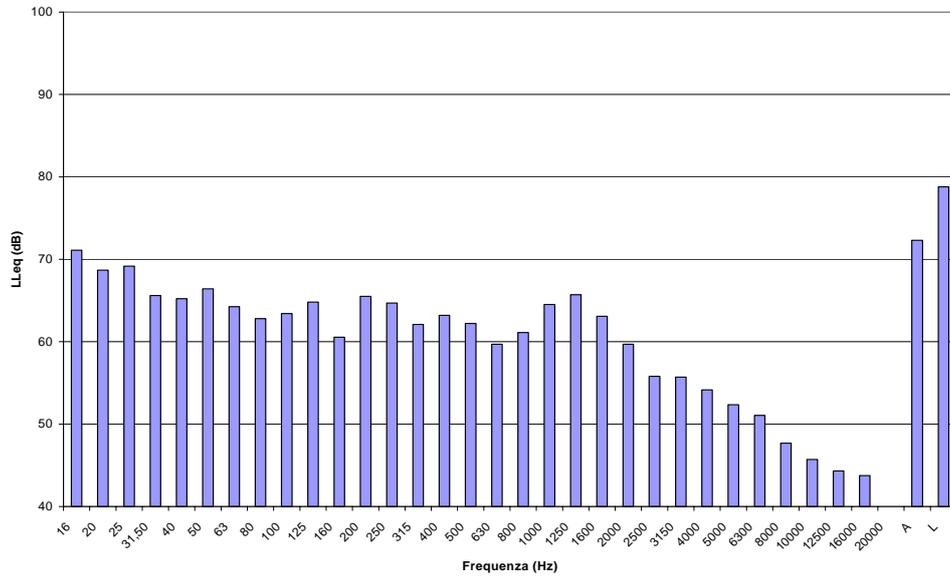


Fig. 66: spettro del LLeq nel punto G con controllo acceso

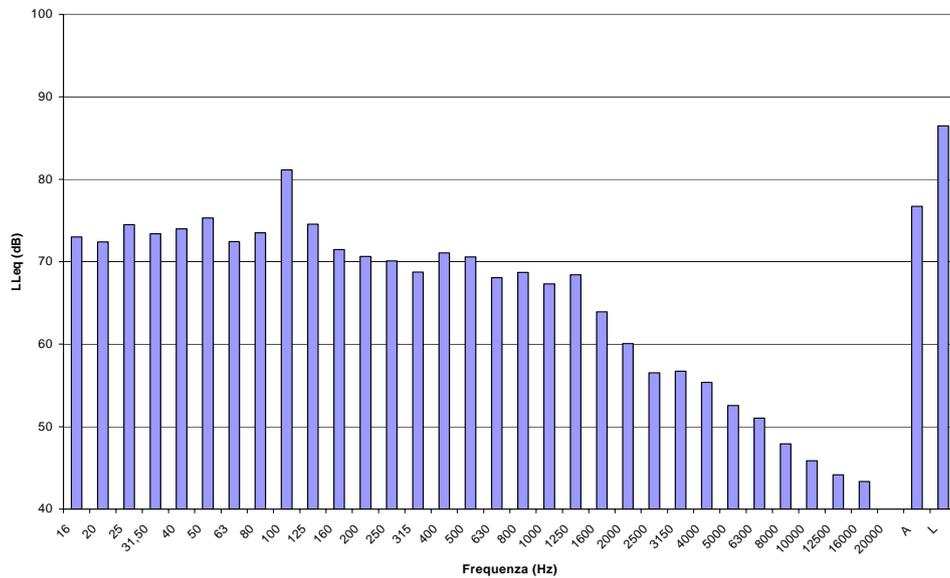


Fig. 67: spettro del LLeq nel punto G con controllo spento

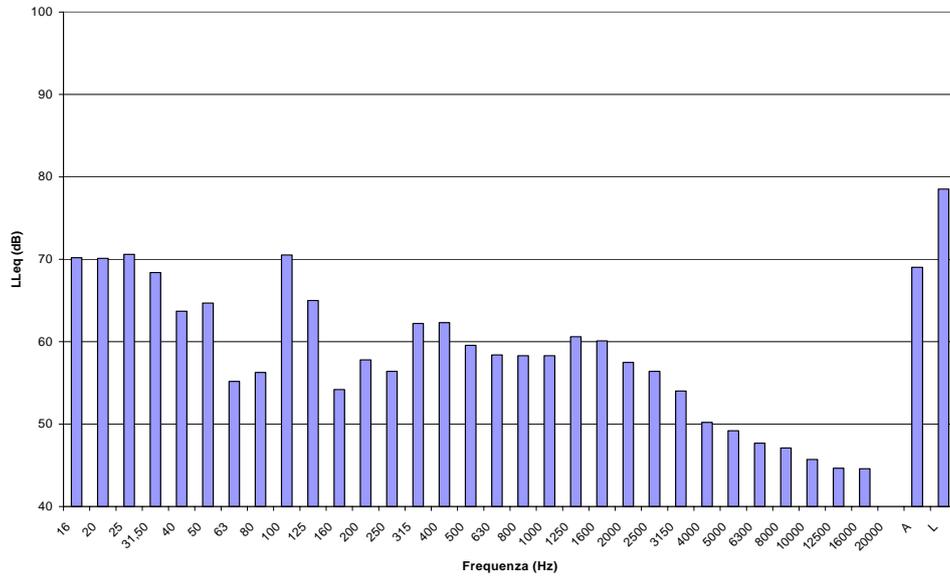


Fig. 68: spettro del LLeq nel punto H con controllo acceso

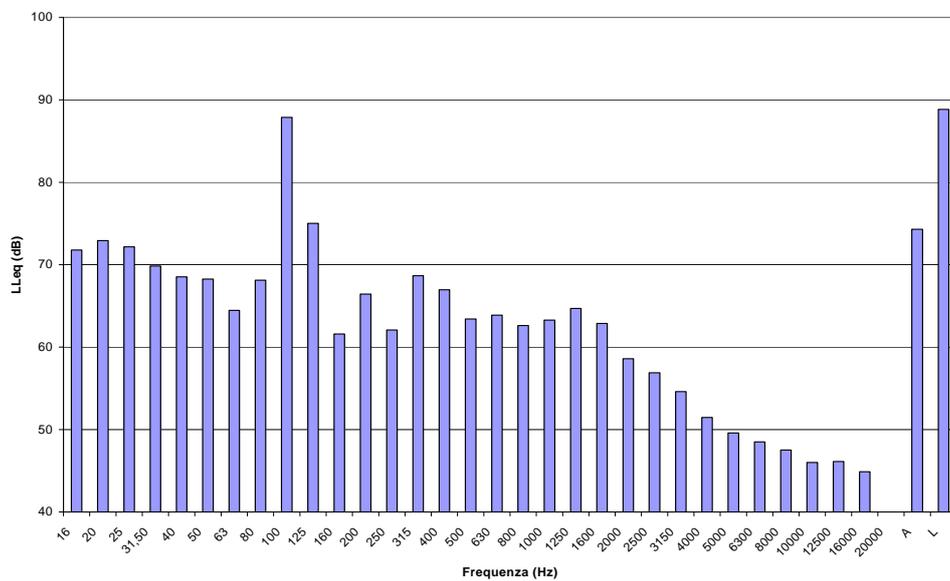


Fig. 69: spettro del LLeq nel punto H con controllo spento

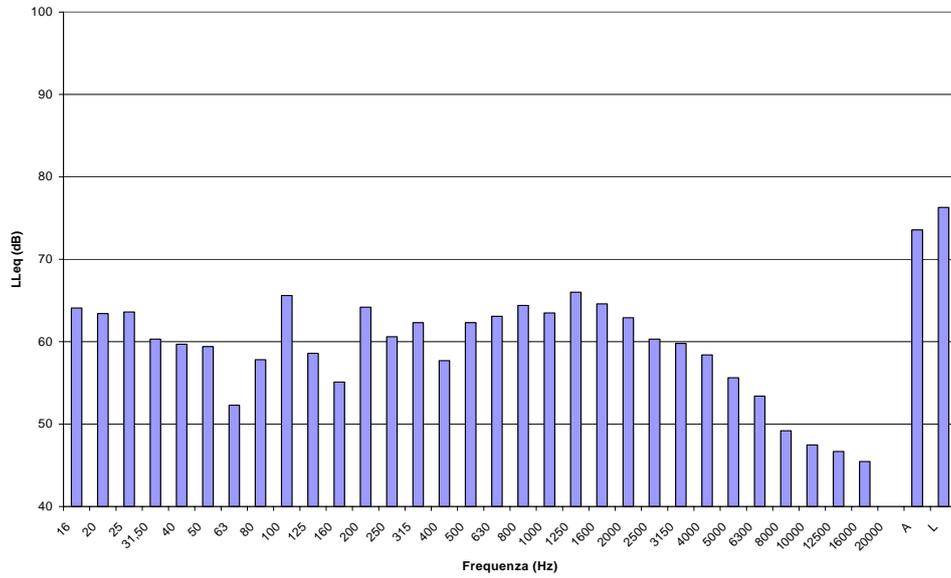


Fig. 70: spettro del LLeq nel punto I con controllo acceso

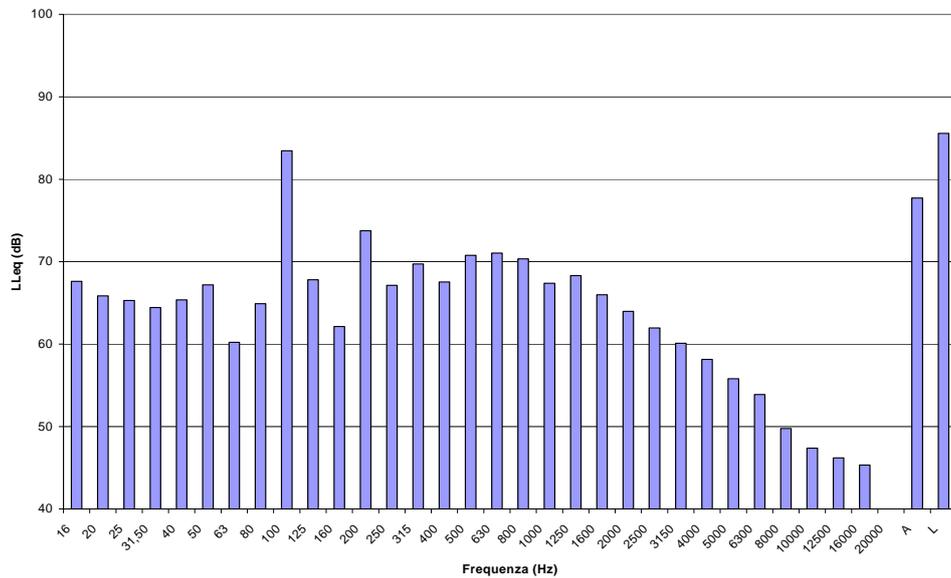


Fig. 71: spettro del LLeq nel punto I con controllo spento

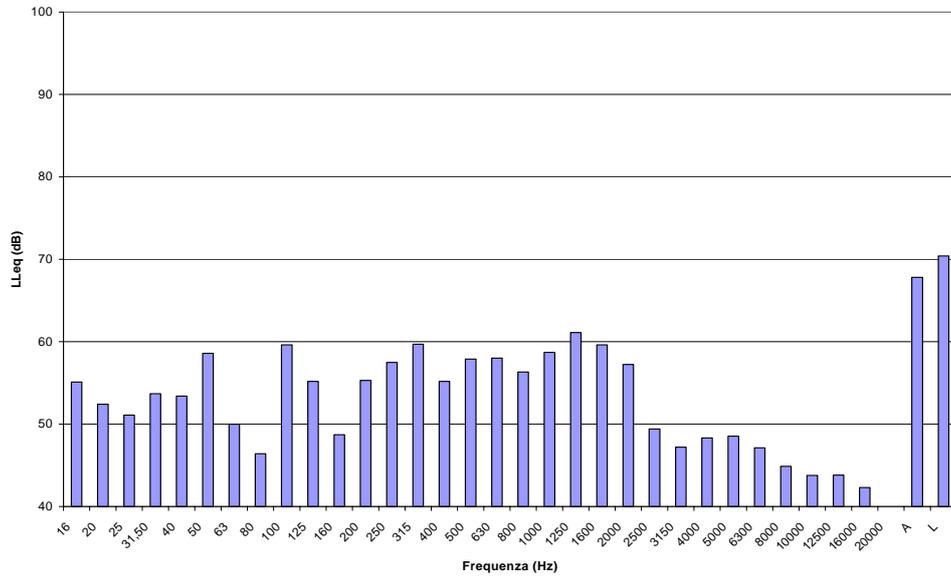


Fig. 72: spettro del LLeq nel punto L con controllo acceso

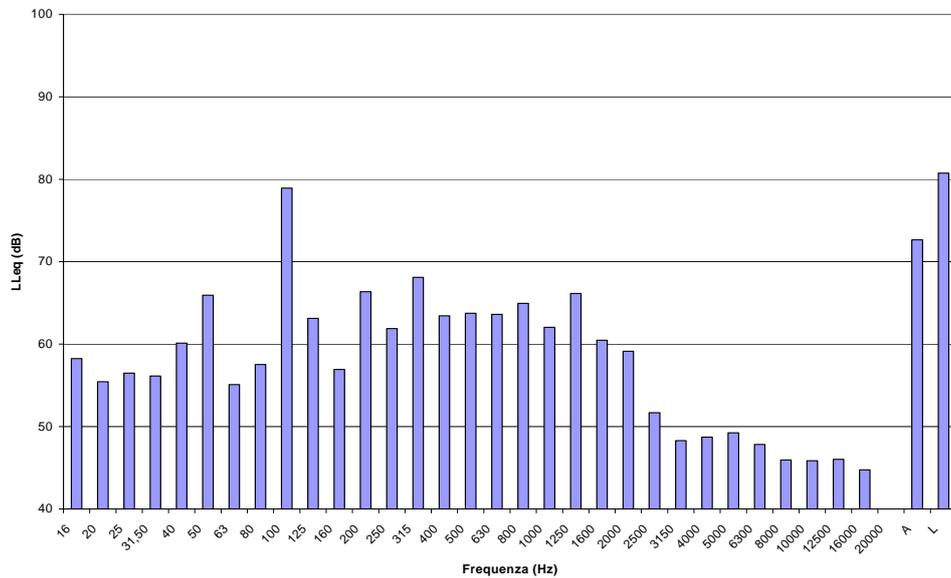


Fig. 73: spettro del LLeq nel punto L con controllo spento

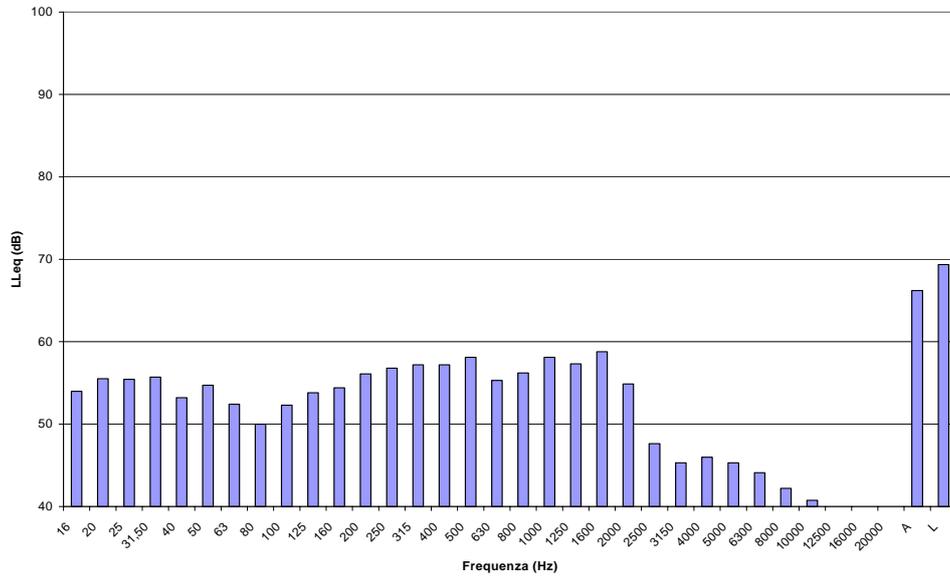


Fig. 74: spettro del LLeq nel punto M con controllo acceso

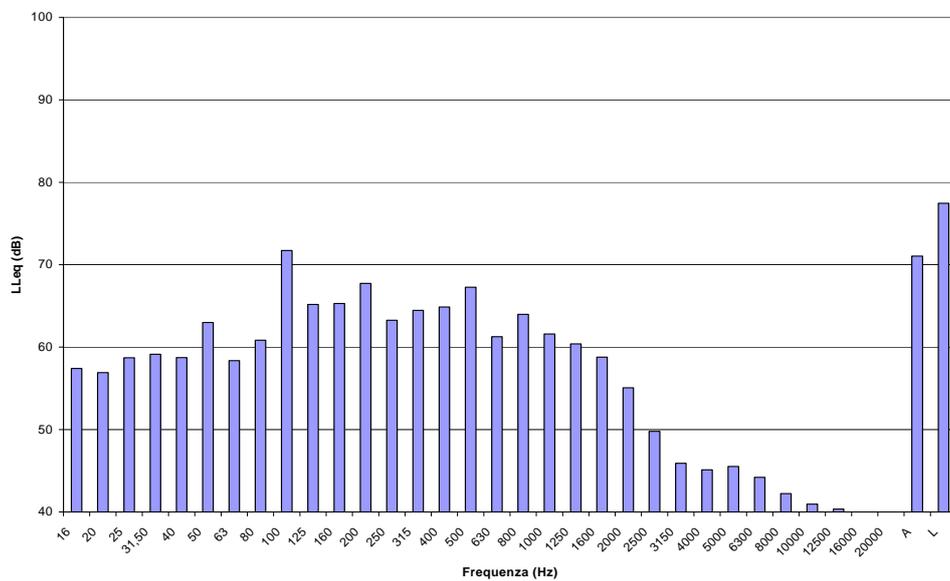


Fig. 75: spettro del LLeq nel punto M con controllo spento

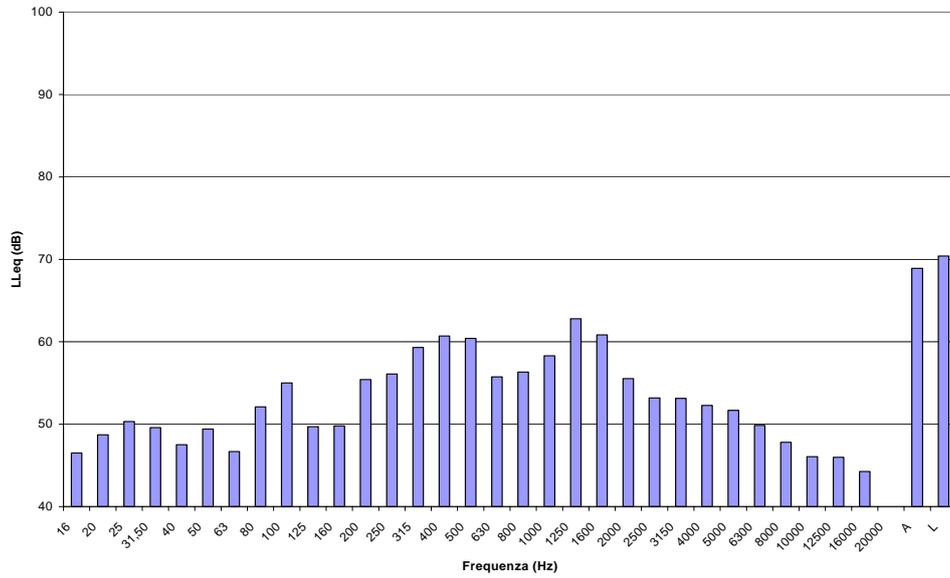


Fig. 76: spettro del LLeq nel punto N con controllo acceso

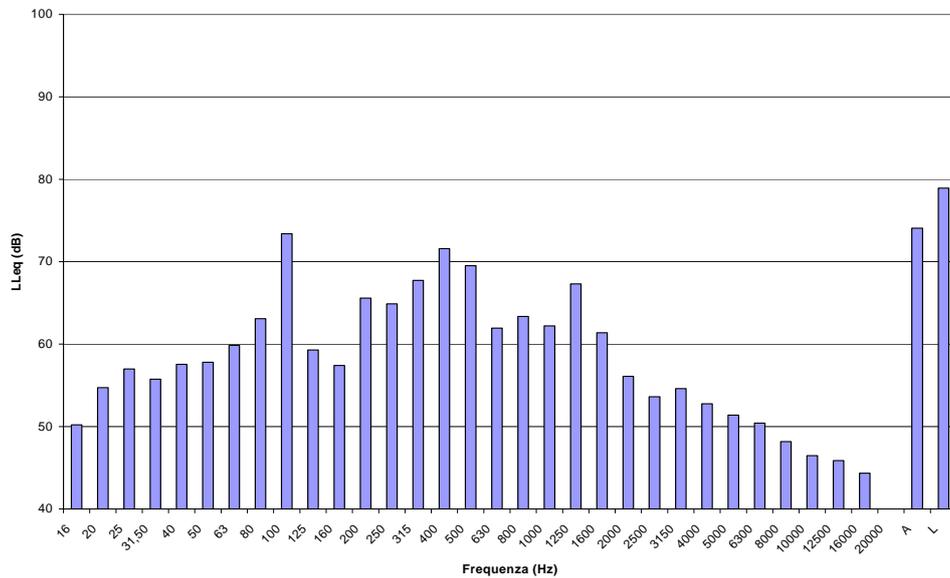


Fig. 77: spettro del LLeq nel punto N con controllo spento

4.7 Commenti ai risultati della seconda serie di misure

Analizzando gli spettri in bande in terzi di ottava ottenuti in condizioni di controllo attivo acceso e spento, si nota come, nella componente principale (100 Hz), il sistema di controllo permetta di ridurre, in media, di circa 16 dB il LLeq rispetto al caso senza controllo. Tale riduzione, come riportato in tabella 9, è massima nel punto M (19.4 dB) e minima in corrispondenza dei punti B e C (14.1 dB); in generale, si può osservare che la riduzione del LLeq aumenta al crescere della distanza dall'uscita della marmitta elettronica, fino ad arrivare a 18.5 – 19.5 dB nei punti L, M e N posizionati ad una distanza di 5 m. Tale circostanza è dovuta al fatto che le componenti alle basse frequenze si propagano in aria in modo più efficace di quelle ad alta frequenza, determinando così valori delle radiazioni crescenti all'aumentare della distanza dall'uscita del condotto di scarico.

Dall'analisi dei risultati riportati in tabella 8, si osserva che, considerando tutte le componenti spettrali del rumore in uscita dalla marmitta elettronica, la riduzione del LLeq ottenuta è, in media, pari a 9.4 dB e varia da un minimo di 7.7 dB, misurato nel punto G, ad un massimo di 11.6 dB, rilevato nel punto B. La riduzione ottenuta del livello equivalente ponderato A risulta significativamente minore rispetto a quella del livello lineare poiché il sistema di controllo agisce soprattutto sulle basse frequenze, che assumono scarsa rilevanza quando lo spettro del rumore è filtrato dalla curva di ponderazione A. Il LAeq è ridotto, in media, di 4.9 dBA; tale riduzione varia da un minimo di 4.0 dBA, misurato nel punto E, ad un massimo di 8.0 dBA, rilevato nel punto C.

A frequenze superiori ai 1000 Hz, l'algoritmo di controllo mostra risultati modesti che sono da imputare al fatto che il DSP non è in grado di inseguire fedelmente le rapide variazioni del segnale d'ingresso; ad alte frequenze è comunque possibile ridurre facilmente l'entità del rumore prodotto attraverso metodi di tipo passivo.

Conclusioni

La presente ricerca ha previsto inizialmente il progetto meccanico, la verifica teorica delle prestazioni acustiche ed infine la realizzazione di un prototipo funzionante di marmitta elettronica per motori a quattro tempi applicata al condotto di scarico di un'autovettura. Lo sviluppo di modelli di propagazione del rumore nei condotti di scarico dei motori ha consentito di individuare circuiti equivalenti elettrici con i quali è possibile calcolare la risposta acustica del condotto di scarico al variare dei parametri geometrici e di funzionamento del motore.

Inoltre, sono state effettuate delle misure di pressione per valutare le perdite di carico prodotte all'interno dei condotti di scarico della marmitta elettronica e di quella tradizionale in dotazione; in particolare è stata rilevata la differenza di pressione statica a monte e a valle delle due marmitte. Si è rilevato che, al crescere del numero di giri del motore, le perdite di carico introdotte dalla marmitta tradizionale sono notevolmente maggiori rispetto a quelle introdotte dalla marmitta elettronica. Da un calcolo effettuato con $\text{rpm}=4000$, in corrispondenza del regime di coppia massima, si è osservato che, sostituendo la marmitta tradizionale in dotazione al veicolo con la marmitta elettronica, si ottiene un miglioramento delle prestazioni di circa il 2%. Questo risultato è dovuto al fatto che la marmitta tradizionale, a differenza di quella elettronica, costituita da un tubo liscio, è composta da una struttura a labirinto; di conseguenza i gas combusti sono maggiormente ostacolati nella fuoriuscita dal condotto di scarico. Prove di consumi effettuate, su strada e da fermo, hanno confermato che la marmitta elettronica garantisce un risparmio di carburante circa pari al

2%.

In seguito è stata individuata un'unità di controllo costituita da un DSP (Digital Signal Processing) e sono stati implementati algoritmi di calcolo in grado di generare il segnale di antirumore sulla base di un segnale di riferimento e di un segnale di errore prelevati da opportuni microfoni, posizionati, rispettivamente, a monte ed a valle della marmitta elettronica.

La marmitta elettronica è stata installata nel condotto di scarico di un'autovettura ed è stata collegata con il sistema di controllo. Dalle verifiche sperimentali effettuate, è risultato che:

- il sistema di controllo permette di ridurre, in media, di circa 16 dB il LLeq nelle componenti principali sia a 2000 che a 3000 rpm;
- la riduzione del LLeq ottenuta è, in media, pari a circa 9.5 dB, sia a 2000 che a 3000 rpm;
- il LAeq è ridotto, in media, di 4 dBA, per un regime di rotazione del motore pari a 2000 rpm, e a 4.9 dBA a 3000 rpm;
- è possibile ottenere un buon sincronismo fra i segnali di riferimento e di errore utilizzando, come riferimento, il segnale rilevato mediante un microfono, posto a monte della marmitta, oppure il segnale di un accelerometro installato solidalmente al corpo motore dell'autovettura. Tale sincronismo non risulta invece soddisfatto usando, come riferimento, il segnale della candela.

I risultati della sperimentazione della marmitta elettronica sul motore a quattro tempi mostrano che la riduzione dei livelli di rumore introdotti da quest'ultima sono paragonabili a quelli relativi alle marmitte tradi-

zionali, con l'indubbio vantaggio di un incremento del rendimento del motore.

Pertanto le possibili soluzioni applicative della marmitta elettronica sono di due tipi:

- in aggiunta (in serie) alla marmitta tradizionale per ridurre ulteriormente le emissioni acustiche, in particolar modo alle basse frequenze, senza compromettere il rendimento del motore;
- in sostituzione della marmitta tradizionale per incrementare il rendimento del motore senza aumentare le emissioni acustiche o addirittura diminuendole, seppur in maniera modesta.

Elenco dei simboli

L	induttanza associata al tubo vuoto della parte finale del condotto di scarico
l	lunghezza del condotto finale dello scarico
S	area della sezione del condotto finale dello scarico
D	diametro della sezione del tubo vuoto della parte finale del condotto di scarico
L_{asm}	induttanza associata alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
C_{asm}	capacità associata alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
R_{asm}	resistenza associata alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
S_{Dm}	superficie del diaframma dell'altoparlante della marmitta elettronica
B_m	induzione magnetica dovuta alla bobina mobile dell'altoparlante della marmitta elettronica
l_b	lunghezza del filo conduttore della bobina mobile dell'altoparlante della marmitta elettronica
L_c	induttanza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
C_c	capacità del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
R_c	resistenza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica

V_{cas}	volume della cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
S_{cas}	superficie della sezione media della cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
l_{cas}	altezza della cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
P_{cas}	pressione dell'aria interna alla cassa acustica dell'altoparlante della marmitta elettronica
E_g	generatore di tensione associato alle onde acustiche emesse dall'altoparlante della marmitta elettronica
R_g	resistenza interna dell'altoparlante della marmitta elettronica
R_e	resistenza elettrica della bobina mobile dell'altoparlante della marmitta elettronica
C_f	capacità associata ai due fori che collegano la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
C_{f1}, C_{f2}	capacità associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
R_f	resistenza associata ai due fori che collegano la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica

R_{f1}, R_{f2}	resistenza associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
L_f	induttanza associata ai due fori che collegano la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
L_{f1}, L_{f2}	induttanza associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
D_{fm}	diametro del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
h_{fm}	spessore del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
S_{fm}	area della sezione del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
V_{fm}	volume del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
P_{fm}	pressione dell'aria interna al foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la camera di accoppiamento della marmitta elettronica
ρ	densità dell'aria

μ	viscosità dinamica dell'aria
γ	rapporto tra il calore specifico a pressione costante e quello a volume costante dell'aria
P_{cm}	pressione dell'aria interna alla camera di accoppiamento della marmitta elettronica
V_{cm}	volume della camera di accoppiamento della marmitta elettronica
D_{cm}	diametro della sezione che collega la camera di accoppiamento con il condotto esterno della marmitta elettronica
h_{cm}	spessore della sezione che collega la camera di accoppiamento con il condotto esterno della marmitta elettronica
S_{cm}	area della sezione che collega la camera di accoppiamento con il condotto esterno della marmitta elettronica
M_{1m}	pendenza del tratto a sezione non costante del condotto esterno della marmitta elettronica
S_{2m}	area della sezione di area costante a forma di corona circolare del condotto esterno della marmitta elettronica
S_{3m}	area della sezione terminale del condotto esterno della marmitta elettronica
l_{2m}	lunghezza del tratto a sezione costante a forma di corona circolare del condotto esterno della marmitta elettronica
l_{3m}	lunghezza del tratto terminale del condotto esterno della marmitta elettronica
$C1$	capacità associata alla cavità interna della camera di accoppiamento della marmitta elettronica

L1	induttanza associata alle onde sonore che fuoriescono dalla camera di accoppiamento verso il condotto terminale della marmitta elettronica
R1	resistenza associata alle onde sonore che fuoriescono dalla camera di accoppiamento verso il condotto terminale della marmitta elettronica
L2	induttanza associata al condotto terminale della marmitta elettronica
Raria	resistenza dell'aria
IL	insertion loss
P_{e0}	pressione sonora misurata prima dell'inserimento del silenziatore
P_{eS}	pressione sonora misurata dopo l'inserimento del silenziatore
ΔP_m	differenza di pressione presente, all'interno del pistone, in corrispondenza al ciclo di lavaggio
p	pressione esterna al pistone (a monte della marmitta)
u_m	velocità media dello stantuffo
u	velocità del bottone di manovella
ω	velocità di rotazione del motore (rad/sec)
R	raggio della manovella
L_{lav}	lavoro associato al ciclo di lavaggio
V_{cil}	volume del cilindro
L_{mot}	lavoro associato al ciclo motore
L_{compl}	lavoro complessivo, dato dalla somma del lavoro del ciclo motore e del ciclo di lavaggio
η	rendimento del motore

H_i	potere calorifico inferiore del combustibile (KJ/Kg)
m_c	massa del combustibile (Kg)
c_s	consumo specifico
rpm	numero di giri del motore al minuto
T_1	temperatura all'interno dei cilindri all'inizio del ciclo di lavaggio
P_1	pressione all'interno dei cilindri all'inizio del ciclo di lavaggio
V_1	volume all'interno dei cilindri all'inizio del ciclo di lavaggio
T_2	temperatura dei gas combusti
P_2	pressione dei gas combusti
G_h	portata volumetrica espressa in m^3/h
G_s	portata volumetrica espressa in m^3/s
ΔP	differenza di pressione misurata a monte e a valle della marmitta
W_{persa}	potenza persa in seguito all'inserimento del silenziatore
W_{motore}	potenza del motore
Perdite	perdite di carico percentuali dovute all'inserimento del silenziatore
$\Delta P_{M.T.}$	differenza di pressione misurata a monte e a valle della marmitta tradizionale
$\Delta P_{M.E.}$	differenza di pressione misurata a monte e a valle della marmitta elettronica
$W_{\text{persa M.T.}}$	potenza persa in seguito all'inserimento della marmitta tradizionale
$W_{\text{persa M.E.}}$	potenza persa in seguito all'inserimento della marmitta elettronica

$\text{Perdite}_{M.T.}$	perdite di carico percentuali dovute all'inserimento della marmitta tradizionale
$\text{Perdite}_{M.E.}$	perdite di carico percentuali dovute all'inserimento della marmitta elettronica
$\theta_C(k)$	vettore dei pesi del filtro di controllo
$c_i(k)$	campioni del filtro di controllo
$\nabla(k)$	gradiente
$E[e^2(k)]$	errore quadratico medio
$e^2(k)$	valore istantaneo dell'errore quadratico medio
$\hat{\nabla}(k)$	stima del gradiente
$\hat{\theta}_C(k)$	stima del vettore dei pesi del filtro di controllo
μ	parametro di adattamento che regola la velocità e la stabilità dell'adattamento dei pesi del filtro di controllo
$d(k)$	rumore primario
$e(k)$	segnale di errore
$x(k)$	segnale di riferimento
$P(q^{-1})$	funzione di trasferimento che modella il percorso secondario
$C(q^{-1},k)$	funzione di trasferimento del filtro di controllo
$\underline{x}_P(k)$	vettore dei campioni del segnale di riferimento filtrati dalla funzione di trasferimento che modella il percorso secondario
$\hat{P}(q^{-1})$	stima della funzione di trasferimento del percorso secondario
$\underline{\hat{p}}(k)$	vettore dei campioni della stima della funzione di trasferimento del percorso secondario

$\underline{\hat{x}}_p(k)$	vettore dei campioni del segnale di riferimento filtrati dalla stima della funzione di trasferimento del percorso secondario
LAeq	livello equivalente ponderato A
LLeq	livello lineare equivalente

Riferimenti bibliografici

- [1] Gianni Bidini, Sergio Stecco, *Motori a combustione interna*, Ed. Pitagora, 1993
- [2] Giancarlo Ferrari, *Motori a combustione interna*, Ed. Il Capitello, 1996
- [3] Trevor A.Laak, *Tonal active control algorithm using overall system modeling*, Digisonics Technology group, Stoughton, U.S.A, Proceedings of ACTIVE 99
- [4] K.Li, T.Tanaka, *Active noise control system with a modified variable step size LMS algorithm*, Traffic safety and nuisance research institute, Tokyo, Japan, Proceedings of Inter-Noise 99
- [5] P.Minogue, N.Rankin, J.Ryan, *Short duct server fan noise cancellation*, Analog Devices B.V., Limerick, Ireland, Proceedings of ACTIVE 99
- [6] Y.Maeda, T.Yoshida, *An active noise control without estimation of secondary-path*, Faculty of Engineering, Kansai University, Osaka, Japan, Proceedings of ACTIVE 99
- [7] P.A.C.Lopes, M.S.Piedade, *Pseudo-random MLB sequences for on-line secondary-path modeling*, Universidade Tecnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, Proceedings of ACTIVE 99
- [8] N.Naoe, H.Yamada, *Reduced effect of capacitor motor noise using active noise control*, Kanazawa Technical College, Dept. of Electrical Engineering, Hisayasu Kanazawa Ishikawa, Japan, Proceedings of Inter-Noise 99
- [9] Scott D.Snyder, *Microprocessors for active control: bigger is not always enough*, Department of Mechanical Engineering, University of Adelaide, South Australia, Proceedings of ACTIVE 99
- [10] M.Winberg, S.Johansson, I.Claesson, *AVIIS, active vibration isolation in ships; an ASAC approach*, The University of Karlskrona/Ronneby, Ronneby, Sweden, Proceedings of ACTIVE 99
- [11] M.Abom, O.Schiegg, *Turbulence noise suppression methods for ANC in ducts*, ABB Corporate Research, Vasteras, Sweden, Proceedings of ACTIVE 99

- [12] J. Couche, C.Fuller, *Active control of power train and road noise in the cabin of a sport utility vehicle with advanced speakers*, Vibration and Acoustic Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, U.S.A., Proceedings of ACTIVE 99
- [13] H.Lan, M.Zhang, W.Ser, *A noise reduced car communication system*, School of EEE, Nanyang Technological University, Singapore, Proceedings of ACTIVE 99
- [14] S.Johansson, P.Persson, I.Claesson, *Active control of propeller-induced noise in an aircraft mock-up*, University of Karlskrona/Ronneby, Ronneby, Sweden, Proceedings of ACTIVE 99
- [15] A.Minguez, M.Requero, V.Ulin, J.S.Gil, *Engine noise cancellation inside an automobile*, Instituto de Investigacion del Automovil (IN-SIA), Madrid, Spain, Proceedings of ACTIVE 99
- [16] O.Jiricek, P.Konicek, *Application of methods of acoustic feedback compensation*, CTU – FEE, Dept.of Physics, Prague, Czech Republic, Proceedings of ACTIVE 99
- [17] A.Roure, *Le controle actif, mais oui ça marche!*, LMA du CNRS, Marseille, France, Publications CETIM (Appl. du controle actif a la reduction des bruits et vibrations)
- [18] G.Chen, N.Saito, M.Abe, S.Makino, T.Sone, *Convergence characteristics of active noise control systems with delayed-x LMS algorithm*, Graduate school of information sciences, Tohoku University, Sendai, Japan, Proceedings of ACTIVE 97