

**Collana Tecnico-Scientifica**  
*diretta da Giorgio Galli*

Quaderno n. 20

FEDERICO ROSSI, ANDREA NICOLINI

SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO  
DEL RUMORE DA ROTOLAMENTO:  
PARAFANGO ELETTRONICO

*febbraio 2004*

**CIRIAF**

Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici



## INDICE

<b>Autori</b> .....	pag. 7
<b>Riassunto</b> .....	pag. 9
<b>Abstract</b> .....	pag. 10
<b>1. Introduzione</b> .....	pag. 11
<b>2. Parafrangente elettronico</b> .....	pag. 13
2.1 Modello di propagazione acustica del sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento.....	pag. 16
<b>3. Unità di controllo ed algoritmi di controllo</b> .....	pag. 27
3.1 L'unità di controllo .....	pag. 27
3.2 Sistema sperimentale .....	pag. 28
3.3 Algoritmi di controllo .....	pag. 35
3.4 Algoritmo LMS .....	pag. 37
3.5 Algoritmo FxLMS .....	pag. 39
3.6 Algoritmo RLS .....	pag. 43
<b>4. Individuazione dell'algoritmo di controllo</b> .....	pag. 45
4.1 Sistema di sviluppo.....	pag. 45
4.2 Confronto fra gli algoritmi proposti .....	pag. 45
4.3 Algoritmo LMS .....	pag. 46
4.4 Algoritmo FxLMS .....	pag. 55
4.5 Algoritmo RLS .....	pag. 64

<b>5. Progetto del parafrangente elettronico</b> .....	pag. 75
5.1 Il banco di prova .....	pag. 75
5.2 Funzionamento del banco di prova .....	pag. 79
5.3 Caratterizzazione acustica del banco di prova.....	pag. 84
5.4 Progetto del parafrangente elettronico .....	pag. 87
<b>6. Realizzazione del prototipo</b> .....	pag. 91
6.1 Caratteristiche meccaniche.....	pag. 92
<b>7. Installazione e collaudo del prototipo</b> .....	pag.101
7.1 Installazione e collaudo.....	pag.101
7.2 Strumentazione fonometrica .....	pag.102
7.3 Modalità di misura.....	pag.102
7.4 Prima serie di misure .....	pag.104
7.5 Seconda serie di misure .....	pag.114
7.6 Terza serie di misure.....	pag.122
7.7 Modifiche apportate al progetto originale del parafrangente elettronico.....	pag.122
<b>8. Verifiche sperimentali del funzionamento del prototipo</b> .....	pag.127
8.1 Verifiche sperimentali.....	pag.127
8.2 Strumentazione fonometrica .....	pag.127
8.3 Modalità di misura.....	pag.128
8.4 Prima serie di misure .....	pag.129
8.5 Seconda serie di misure .....	pag.140

**9. Conclusioni**.....pag.141  
**10. Lista dei simboli** .....pag.143  
**11. Bibliografia** .....pag.149



## **AUTORI**

### *Federico Rossi*

Nato a Perugia nel 1966, laureato in Ingegneria Elettronica nel 1992, è ricercatore confermato di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Ingegneria di Perugia e docente di Docente dei Corsi di Fisica Tecnica 1 e Proprietà Termofisiche dei Materiali presso il Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali di Terni. Segretario del CIRIAF, è autore di oltre 50 pubblicazioni nei settori delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica e della trasmissione del calore. Nel settembre 2003 è risultato idoneo ad una valutazione comparativa ad un posto di Professore Associato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia nel settore scientifico disciplinare ING-IND/11 "Fisica Tecnica Ambientale".

### *Andrea Nicolini*

Nato a Perugia nel 1972, si è laureato in Ingegneria Elettronica nel 1998; ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica Ambientale nel Maggio 2003. E' vincitore nel Novembre 2002 di un Concorso per Assegno di Ricerca presso l'Università degli Studi di Perugia dal titolo "Controllo Attivo del Rumore Ferroviario". Dal. 1999/2000 svolge esercitazioni ai Corsi della Sezione di Fisica Tecnica dell'Università di Perugia e del Corso di Laurea in Ingegneria dei Materiali a Terni. E' autore di ol-

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrangente elettronico*

---

tre 20 pubblicazioni nel campo delle proprietà termofisiche dei materiali, dell'acustica e della trasmissione del calore.

## **RIASSUNTO**

*Il rumore da rotolamento, prodotto dal contatto dinamico tra pneumatico e manto stradale, rappresenta il contributo principale al rumore veicolare quando la velocità del veicolo è superiore ai 100 km/h. Allo stato attuale, i metodi per la riduzione del rumore da rotolamento sono:*

- pneumatici con battistrada di forma particolare;*
- asfalti fonoassorbenti.*

*Nel presente lavoro vengono proposti e messi a confronto metodi attivi alternativi per la riduzione del rumore da rotolamento. Tali metodi sono stati applicati realizzando due prototipi di concezione originale che lavorano in condizioni stazionarie con un rumore da rotolamento precedentemente registrato.*

**ABSTRACT**

*Rolling noise, due to the tyre-pavement dynamical contact, is the main contribute to traffic noise when vehicle speed is higher than 100 km/h. Actually rolling noise reduction methods are:*

- *particular tyre engraving shape;*
- *absorbing pavements.*

*In this work alternative active methods for rolling noise reduction are proposed and compared. Such methods have been applied by realizing original prototypes which work on steady conditions with a previous recorded rolling noise.*

## **1. INTRODUZIONE**

L'attenuazione dei rumori prodotti dal rotolamento dei pneumatici a contatto con la pavimentazione stradale rappresenta una tappa importante per la riduzione del rumore dovuto al traffico stradale. Nella maggior parte delle città italiane ed europee i livelli di rumore ambientale superano per molte ore al giorno i massimi livelli stabiliti dalla legge (L. 447/95) come testimoniano varie ricerche ed in particolare il Libro Verde della Commissione Europea "Sulle politiche future in materia di inquinamento acustico" del 4.11.96.

Gli interventi attuati per ridurre il rumore sono stati indirizzati fino ad oggi verso sistemi passivi:

- *barriere acustiche;*
- *coibentazione e cofanatura dei veicoli;*
- *asfalti speciali atti a ridurre le emissioni acustiche causate dal rotolamento.*

Il funzionamento del parafango elettronico è basato sul controllo attivo del rumore e permette di intervenire direttamente sulla sorgente pneumatico - pavimentazione stradale e quindi costituisce una valida alternativa agli interventi sull'infrastruttura quali barriere antirumore, gallerie, etc. che non sempre sono possibili e la cui efficacia è limitata.

Il principio fisico su cui si basa la cancellazione attiva del rumore consiste nella sovrapposizione degli effetti: viene generato un segnale di

cancellazione (o antirumore) di uguale ampiezza ma fase opposta rispetto al segnale di rumore; l'interferenza fra i due segnali determina una notevole riduzione del rumore emesso dalla sorgente.

Sulla base di queste considerazioni, il parafango elettronico viene installato in prossimità di ciascuna ruota, è provvisto di uno, due o più altoparlanti che generano un rumore di uguale ampiezza ma fase opposta rispetto al rumore prodotto dal rotolamento.

Ciascun altoparlante, installato in un'apposita cassa acustica, è pilotato da un'unità di controllo utilizzata per l'elaborazione numerica dei segnali. A questo scopo si fa uso di schede DSP di ultima generazione opportunamente implementate con algoritmi e programmi originali.

## **2. PARAFANGO ELETTRONICO**

Il dispositivo parafango elettronico ha lo scopo, utilizzando un sistema di controllo attivo del rumore, di ridurre il rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale.

Tale sistema è costituito da un opportuno altoparlante che deve essere installato sul parafango del veicolo. L'altoparlante è pilotato da un'unità di controllo i cui i dati di ingresso sono il numero di giri per unità di tempo del pneumatico (segnale di riferimento) ed un segnale di errore prelevato da un opportuno microfono. In questo capitolo viene descritto un sistema sperimentale originale che permette di simulare l'emissione del rumore da rotolamento. In questo modo è possibile testare in laboratorio il sistema di controllo in differenti condizioni di funzionamento. Infatti la calibrazione, l'ottimizzazione e la verifica del sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento sono molto difficili da ottenere in condizioni di movimento del veicolo.

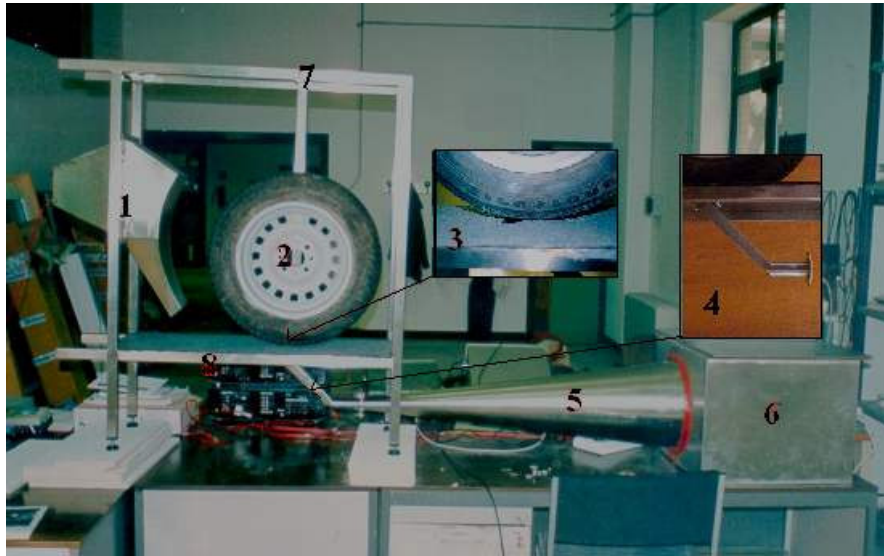
Il sistema sperimentale che simula il rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale, è composto, come indicato in Fig. 1, dai seguenti elementi: Registratore D.A.T., altoparlante che riproduce il rumore da rotolamento, condotto di adattamento dell'impedenza acustica, terminale di emissione del rumore da rotolamento prodotto dal contatto pneumatico – pavimentazione stradale, pneumatico, lamina piana coperta da una pellicola di materiale simile all'asfalto, struttura regolabile, altoparlante di controllo.

Il D.A.T. riproduce il rumore da rotolamento precedentemente registrato (possono essere riprodotte sia la fase di compressione dell'aria che quella di rarefazione); l'uscita del D.A.T. è inviata all'altoparlante di rumore che emette le onde sonore all'interno del condotto di adattamento dell'impedenza acustica.

L'altoparlante di rumore è isolato dall'ambiente esterno tramite una cassa acustica riempita di materiale fonoassorbente che elimina gli effetti indesiderati dovuti alla radiazione emessa dal lato posteriore del diaframma, dissipando il corrispondente flusso di potenza in calore, e permette una propagazione sonora alle sole onde prodotte dalla faccia anteriore dell'altoparlante.

Il condotto di adattamento dell'impedenza acustica ha la forma di un cono, la cui sezione terminale è collegata ad un condotto, di forma particolare (vedi Fig. 1), che termina sulla lamina piana coperta da una pellicola di materiale simile all'asfalto.

Un comune pneumatico è posizionato sulla lamina piana; il contatto pneumatico - lamina avviene in corrispondenza della sezione finale del condotto che riproduce l'emissione reale del rumore da rotolamento (sorgente primaria). Il pneumatico e l'altoparlante del sistema di controllo sono ancorati alla struttura; la loro posizione può essere regolata in modo da determinare le prestazioni migliori del sistema di controllo attivo.



- Legenda:
- 1. emettitore del sistema di controllo attivo;*
  - 2. pneumatico;*
  - 3. contatto pneumatico – lamina;*
  - 4. terminale di emissione del contatto pneumatico – lamina;*
  - 5. condotto di adattamento dell'impedenza acustica;*
  - 6. cassa acustica contenente l'altoparlante di rumore;*
  - 7. struttura regolabile;*
  - 8. lamina piana coperta da una pellicola di materiale simile all'asfalto.*

**Fig. 1:** *sistema sperimentale per il controllo attivo del rumore da rotolamento prodotto dal contatto pneumatico – pavimentazione stradale.*

Le sorgenti acustiche secondarie e primarie sono accoppiate in virtù della vicinanza fra la bocchetta di uscita del parafango ed il terminale di

emissione del contatto pneumatico - lamina; in questo modo è possibile modificare l'impedenza di radiazione della sorgente primaria. Durante le esperienze di laboratorio, per la rilevazione del segnale d'errore, è utilizzato un microfono comune; posizionato nello spazio che separa la bocchetta di uscita del parafango ed il terminale di emissione del contatto pneumatico - lamina.

## 2.1 MODELLO DI PROPAGAZIONE ACUSTICA DEL SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE DA ROTOLAMENTO

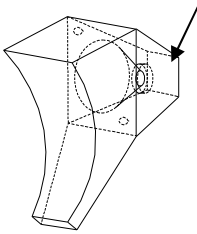
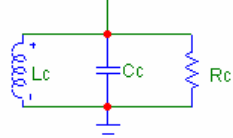
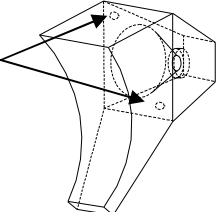
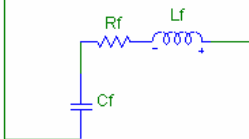
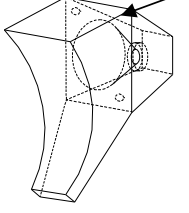
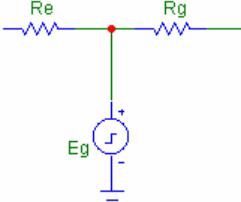
Le caratteristiche acustiche del parafango elettronico sono state analizzate individuando un circuito elettrico equivalente, in cui ogni componente elettrico corrisponde ad una specifica parte meccanica del dispositivo stesso.

L'analogia tra componenti meccanici ed elettrici equivalenti è descritta nella tabella 1.

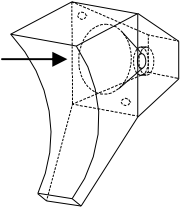
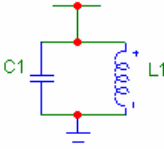
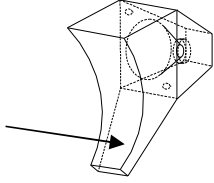

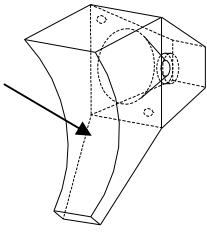


Il parafango elettronico riesce a generare il segnale di antirumore grazie all'ausilio di un altoparlante FENNER DW 200C di potenza 150W.

Come indicato nella tabella 1, l'altoparlante, la corrispondente cassa acustica ed i fori che la collegano direttamente alla cavità del parafango, si comportano come un circuito risonante RLC parallelo ed un circuito RLC serie.

**Tabella 1:** corrispondenza tra parti meccaniche del parafrango elettronico e componenti elettrici equivalenti.

<i>Tipo di componente</i>	<i>Componente meccanico</i>	<i>Componente elettrico</i>
Cassa acustica		
Fori di connessione tra l'interno della cassa acustica ed il Parafrango		
Segnale di antirumore generato dall'altoparlante		

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafango elettronico*

Cavità iniziale del parafango		
Uscita cavità iniziale del parafango		
Condotto finale di uscita dell'antirumore		
Resistenza dell'aria		

Il segnale generato dall'altoparlante è riprodotto tramite il generatore di tensione  $E_g$ ;  $R_g$  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 uti-

lizzando le seguenti formule:

$$C_c = \frac{L_{as} \cdot S_{Dm}^2}{B_m^2 \cdot l_b^2} = 7.8 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (2.1)$$

$$L_c = \frac{C_{as} \cdot B_m^2 \cdot l_b^2}{S_{Dm}^2} = 5.1 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.2)$$

$$R_c = \frac{B_m^2 \cdot l_b^2}{S_{Dm}^2 \cdot R_{as}} = 4.2 \cdot 10^5 \left[ \frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (2.3)$$

dove  $R_{as}$ ,  $C_{as}$  e  $L_{as}$ , che rappresentano rispettivamente resistenza, capacità ed induttanza associate alla cassa acustica, sono valutate come segue:

$$C_{as} = \frac{V_{cas}}{\gamma \cdot P_{cas}} = 5.0 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (2.4)$$

$$L_{as} = \frac{\rho \cdot l_{cas}}{S_{cas}} = 7.9 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.5)$$

$$R_{as} = \frac{\mu}{V_{cas}} = 2.4 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (2.6)$$

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

Per valutare i componenti del circuito RLC serie, associato ai due fori che collegano l'interno della cassa acustica alla cavità interna del parafrangente, poiché i componenti elettrici equivalenti associati a ciascun foro possono essere considerati in parallelo fra loro, sono state utilizzate le seguenti relazioni:

$$L_{f1} = L_{f2} = \frac{\rho}{D_{fm}} = 60.0 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.7)$$

$$R_{f1} = R_{f2} = \frac{ln \frac{D_{fm}}{h_{fm}}}{4 \cdot S_{fm}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \mu} = 332.2 \left[ \frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (2.8)$$

$$C_{f1} = C_{f2} = \frac{V_{fm}}{\gamma \cdot P_{fm}} = 3.36 \cdot 10^{-12} \left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (2.9)$$

dove  $D_{fm}$  è il diametro dell'apertura,  $h_{fm}$  lo spessore del singolo foro,  $\omega$  la pulsazione e  $\mu$  la viscosità dell'aria.

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

Per quanto concerne la cavità interna del parafango, la parte iniziale può essere associata ad una capacità, corrispondente alla cavità stessa, in parallelo ad una induttanza, associata all'onda sonora che si propaga al suo interno:

$$C_l = \frac{V_{ci}}{\gamma \cdot P_{ci}} = 4.3 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (2.10)$$

$$L_l = \frac{\rho \cdot l_{ci}}{S_{ci}} = 2.9 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.11)$$

Il segnale di antirumore fuoriesce dalla cavità iniziale attraverso un'apertura corrispondente ad un'induttanza con una resistenza in serie; i valori determinati sono i seguenti:

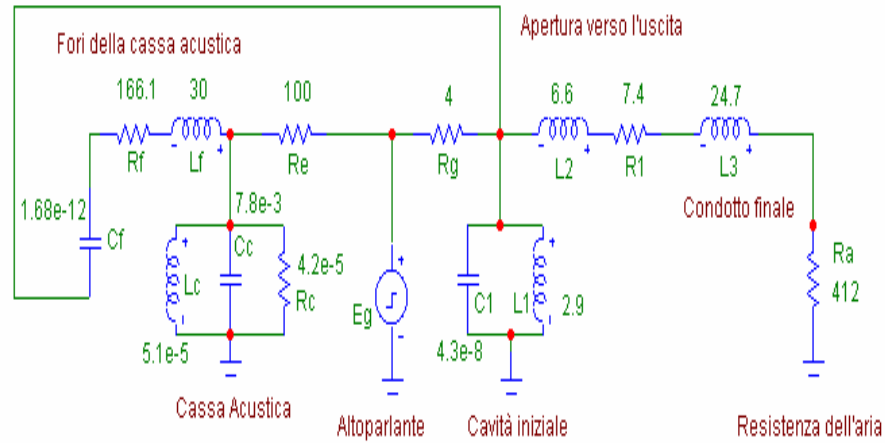
$$L_2 = \frac{\rho}{D_{cf}} = 6.6 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.12)$$

$$R_l = \frac{\ln \frac{D_{cf}}{h_{cf}}}{4 \cdot S_{cf}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot \mu} = 7.4 \left[ \frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (2.13)$$

Il condotto terminale della marmitta elettronica, dove fuoriesce il segnale di antirumore, è schematizzabile con una semplice induttanza, il cui valore è espresso dalla seguente formula:

$$L_3 = \frac{\rho \cdot l_{ct}}{S_{ct}} = 24.7 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (2.14)$$

Infine, il circuito equivalente, rappresentato in Fig. 2, si chiude sulla resistenza di carico dell'aria, corrispondente a circa  $412 \Omega$ .



**Fig. 2:** circuito equivalente del parafrangente elettronico.

Nella tabella 2 sono riassunti i valori dei componenti elettrici presenti nel circuito equivalente e quelli delle grandezze utilizzate per ricavarli.

**Tabella 2:** valori dei componenti elettrici presenti nel circuito equivalente e delle grandezze usate per ricavarli.

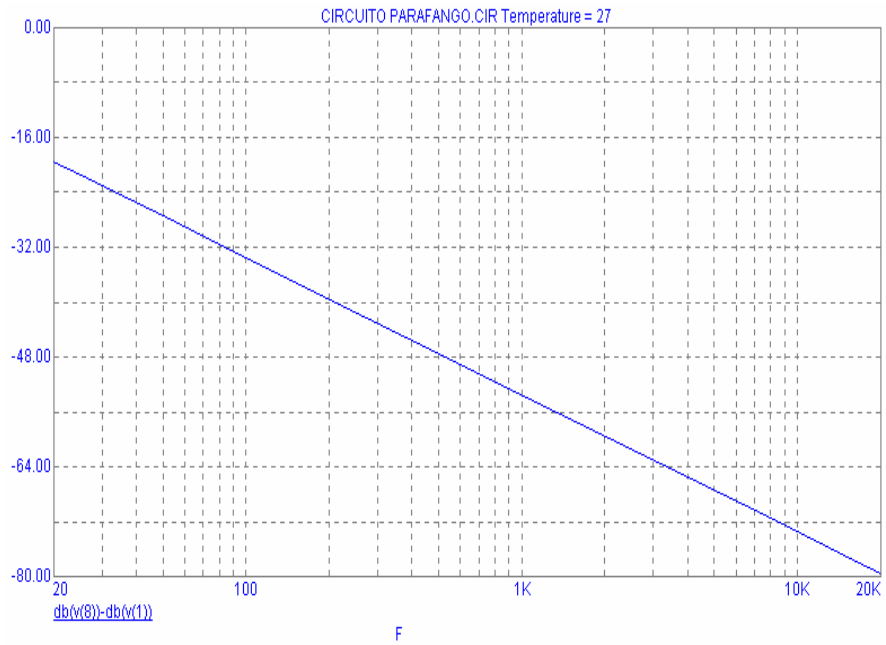
<i>Tipo di componente</i>	<i>Valori delle grandezze meccaniche utilizzate</i>	<i>Valori dei componenti elettrici del circuito equivalente</i>
Cassa acustica	$V_{cas} = 0.007 \text{ m}^3$ $S_{cas} = 0.032 \text{ m}^2$ $S_{Dm} = 0.031 \text{ m}^2$ $l_{cas} = 0.212 \text{ m}$	$C_c = 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ F}$ $L_c = 5.1 \cdot 10^{-5} \text{ H}$ $R_c = 4.2 \cdot 10^5 \text{ } \Omega$
Fori di connessione tra l'interno della cassa acustica e la cavità interna del parafango	$D_{fm} = 0.020 \text{ m}$ $h_{fm} = 0.0015 \text{ m}$ $S_{fm} = 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ $V_{fm} = 4.71 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$	$C_{f1} = C_{f2} = 3.36 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ $L_{f1} = L_{f2} = 60.0 \text{ H}$ $R_{f1} = R_{f2} = 332.2 \text{ } \Omega$
Segnale di antirumore generato dal parafango		$R_g = 4 \text{ } \Omega$ $R_e = 100 \text{ } \Omega$
Cavità interna del parafango	$V_{ci} = 6.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ $l_{ci} = 0.120 \text{ m}$ $S_{ci} = 4.9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$	$C_l = 4.3 \cdot 10^{-8} \text{ F}$ $L_l = 2.9 \text{ H}$

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafango elettronico*

Uscita cavità interna del parafango	$D_{cf} = 0.180 \text{ m}$ $h_{cf} = 0.0015 \text{ m}$ $S_{cf} = 0.026 \text{ m}^2$	$L_2 = 6.6 \text{ H}$ $R_l = 7.4 \text{ } \Omega$
Condotto finale di uscita dell'antirumore	$S_{ct} = 0.010 \text{ m}^2$ $l_{ct} = 0.220 \text{ m}$	$L_3 = 24.7 \text{ H}$
Resistenza dell'aria		$R_{aria} = 412 \text{ } \Omega$

Il comportamento del circuito elettrico equivalente di Fig. 2 è stato analizzato utilizzando il software di analisi Micro-Cap 6. In Fig. 3 è riportata la funzione di trasferimento ottenuta che, all'interno della banda acustica, presenta un comportamento di tipo passa basso.

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafango elettronico*



**Fig. 3:** *funzione di trasferimento del circuito equivalente del parafango elettronico.*



### **3. UNITÀ DI CONTROLLO ED ALGORITMI DI CONTROLLO**

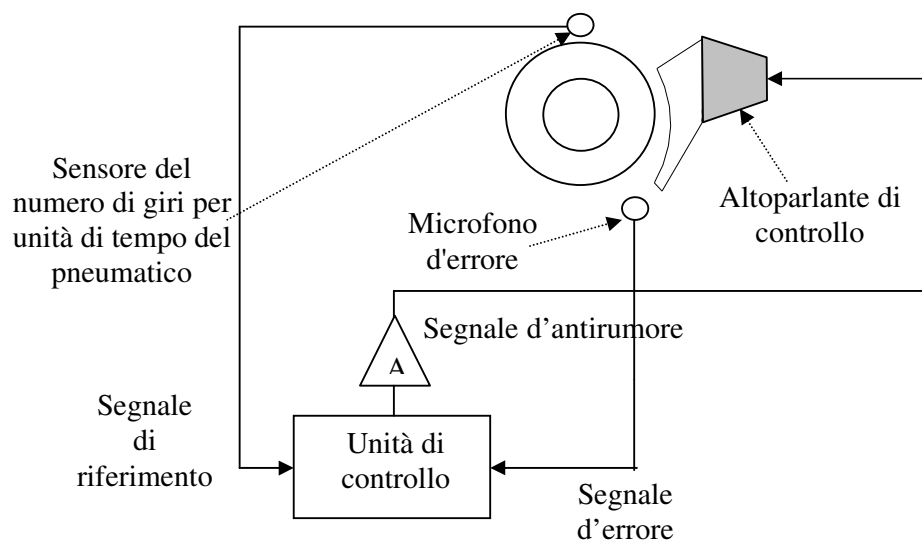
#### **3.1 L'UNITÀ DI CONTROLLO**

Il parafrangente elettronico è il dispositivo elettroacustico che emette il segnale dell'antirumore e provvede all'accoppiamento con il rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale.

Il segnale dell'antirumore viene generato da un'unità di controllo il cui funzionamento è basato su tecniche di elaborazione numerica del segnale; in particolare il segnale di rumore da rotolamento viene opportunamente “trattato” in modo che sia minimo il segnale acustico di uscita dal parafrangente elettronico; a tale proposito un microfono (microfono d'errore) verifica l'ampiezza del segnale acustico presente in prossimità del contatto ruota – pavimentazione stradale.

In Fig. 4 si riporta lo schema di funzionamento dell'unità di controllo. L'elaborazione numerica del segnale di rumore da rotolamento viene effettuata grazie ad algoritmi di concezione originale.

Il segnale di antirumore generato dall'unità di controllo (vedere Fig. 4) viene amplificato mediante un amplificatore lineare di potenza che alimenta l'altoparlante installato nel parafrangente elettronico.



**Fig. 4:** *schema di funzionamento dell'unità di controllo.*

### 3.2 SISTEMA SPERIMENTALE

Per la verifica del sistema di controllo attivo del rumore, il parafango elettronico ed il sistema di controllo sono stati testati nel banco di prova descritto nel capitolo 5.

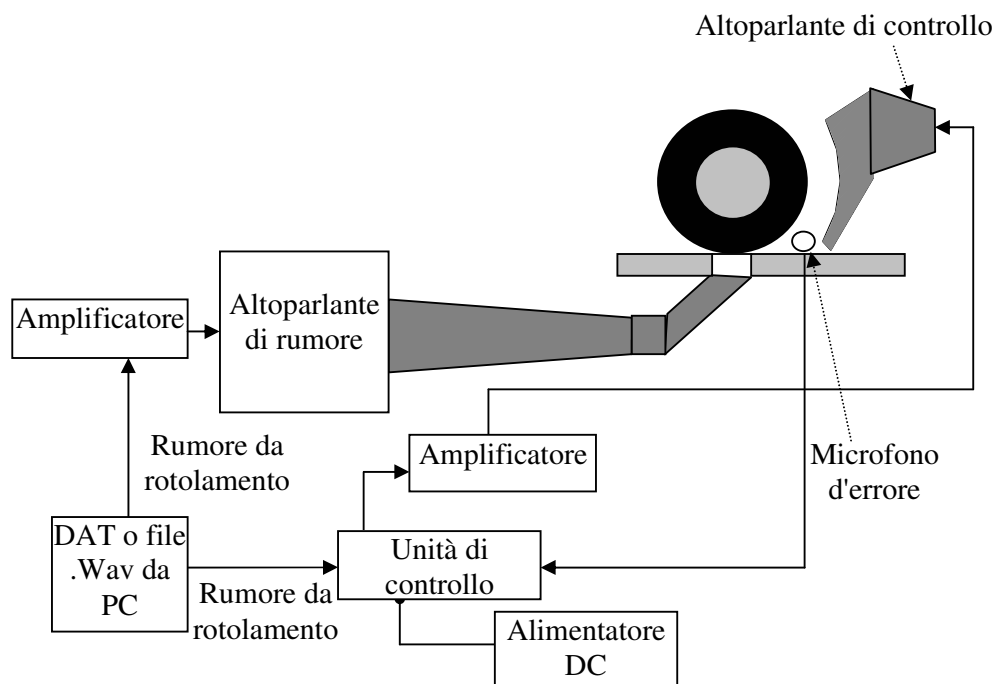
A tal proposito è stato adottato lo schema sperimentale riportato in Fig. 5 nel quale sono presenti i seguenti componenti:

1) DAT (Digital Audio Recorder) TCD-D7 della Sony: è un sistema digitale per la registrazione e riproduzione del suono. Su nastro magnetico sono registrate stringhe a 16 bit; permette un rapporto segnale/rumore su-

periore agli 87 dB. Il segnale registrato sul nastro è costituito dal segnale di rumore da ridurre tramite il sistema utilizzato. Per evitare di dover riavvolgere il nastro all'inizio di ogni prova sperimentale, il segnale registrato è stato trasferito su PC in formato "wav".

2) Amplificatori TA-FE710R della Sony: ne sono stati utilizzati due; uno per amplificare il segnale in ingresso al parafango elettronico, l'altro per pilotare l'altoparlante che riproduce il rumore da rotolamento. Il modello utilizzato è caratterizzato da una potenza di 100 W per canale con un'impedenza di carico compresa tra i 4 e i 16 ohm.

3) L'unità di controllo è costituita da un DSP (Digital Signal Processing) ADSP 21061 della Analog Devices: si tratta di un DSP appartenente alla famiglia ADSP 21000 prodotto dalla Analog Devices con architettura SHARC. Il 21061 lavora a 32 bit in virgola mobile ed è specifico per il processamento di segnali vocali, sonori e grafici. Lo SHARC costituisce il cuore del DSP sulla famiglia ADSP 21000 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 può eseguire ogni istruzione in un singolo ciclo. Il cuore del processore 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.



**Fig. 5:** *schema a blocchi del sistema sperimentale.*

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

- Loops: sequenza di istruzioni da eseguire diverse volte con zero-overhead che è l'abilità del processore di ripetere l'istruzione senza utilizzare il tempo altrimenti necessario per saltare all'inizio

dell'istruzione stessa.

- Subroutines: il processore interrompe temporaneamente il flusso sequenziale 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: un caso particolare di subroutines nella quale l'esecuzione della routine è condizionata da un evento che accade al tempo d'avvio e non da un'istruzione del programma.
- Idle: una speciale istruzione che causa la cessazione delle operazioni in corso sul processore, mantenendo lo stato attuale. Quando avviene un interrupt, il processore si dedica a quest'ultimo e continua la normale esecuzione.

Il Program Sequencer ha il compito di gestire queste strutture di programma: il suo scopo principale è, infatti, quello di selezionare l'indirizzo della successiva istruzione da eseguire. Oltre a questo esegue una vasta gamma di altre funzioni.

I DAGs semplificano il compito di organizzare i dati mantenendo i puntatori in memoria: 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 permettono l'esecuzione delle operazioni con la massima efficienza poiché le unità computazionali si dedica-

no esclusivamente al processamento dei dati.

Il processore include, inoltre, un timer ad intervalli programmabili che può generare interrupt periodici: si programma scrivendo i valori nei suoi due registri e controllando le operazioni attraverso un bit in un registro apposito. Un'uscita esterna, TIMEXP, segnala agli altri dispositivi che il contatore del timer è scaduto.

Un file di registro è usato per trasferire dati tra le unità computazionali ed i bus dati immagazzinando anche i vari risultati intermedi. E' composto da 10 porte che contengono 32 registri, 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.

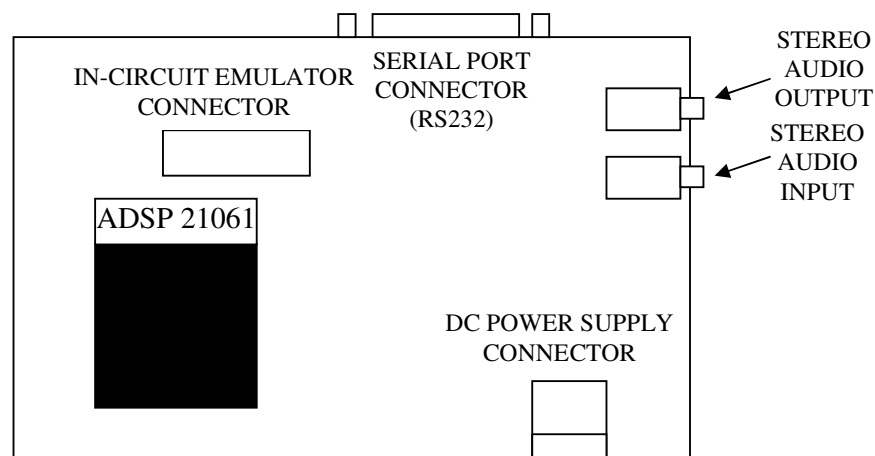
La memoria è suddivisa in due blocchi: uno specifico per il programma, l'altro utilizzato per l'immagazzinamento dei dati. Il DMA (Accesso Diretto in Memoria) fornisce vari tipi di meccanismi per il trasferimento di un intero blocco di dati, ciascuno in ambedue le direzioni:

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

Il DSP 21061 possiede inoltre due porte seriali sincrone indipendenti, SPORT0 e SPORT1, che forniscono un'interfaccia I/O ad una grande varietà di dispositivi periferici. Le porte seriali possono trasmettere e ricevere indipendentemente fornendo una maggiore flessibilità per le comunicazioni seriali.

La scheda in cui è contenuto il DSP appena descritto può essere semplicemente schematizzata come in Fig. 6. Essa presenta una porta seriale RS-232 che permette la comunicazione con un host computer utilizzando protocolli seriali asincroni. Il software di sviluppo utilizzato permette comunque di controllare il corretto funzionamento del DSP attraverso una scheda emulatore EZ-ICE inserita in uno degli slot ISA del PC.

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



**Fig. 6:** *schema della scheda contenente il DSP.*

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.

Attraverso una scheda di conversione D/A e un'uscita jack stereo analogica alla precedente è possibile poi ottenere fino a due segnali elettrici in uscita.

4) Alimentatore di potenza DC AL 862 (Alpha Elettronica): è un alimentatore duale con limitatore di corrente che permette di ottenere, a partire dalla tensione di rete, da 0 a 30 V DC in uscita. Nel sistema di controllo utilizzato, l'uscita è fissata a 9V per l'alimentazione della scheda DSP.

5) Preamplificatore microfonico prodotto dalla Mesa, modello R31S.

6) Microfono a condensatore prodotto dalla RION, modello UC-53A; sensibilità relativa a circuito aperto  $-25.5$  dB, capacità di armatura 12 pF, resistenza di "leakage"  $10^{12}$   $\Omega$  (a umidità relativa pari all'85%).

In Fig. 7 è riportata la curva di calibrazione del microfono, ottenuta sotto le seguenti condizioni di test: frequenza 1000 Hz, tensione di polarizzazione 0 V, pressione 762 mmHg, umidità relativa 42%, temperatura 23°.

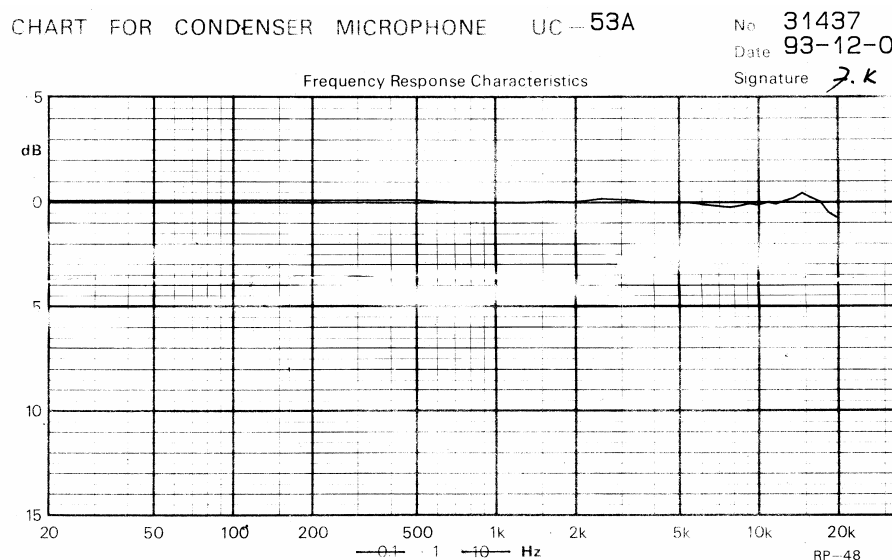


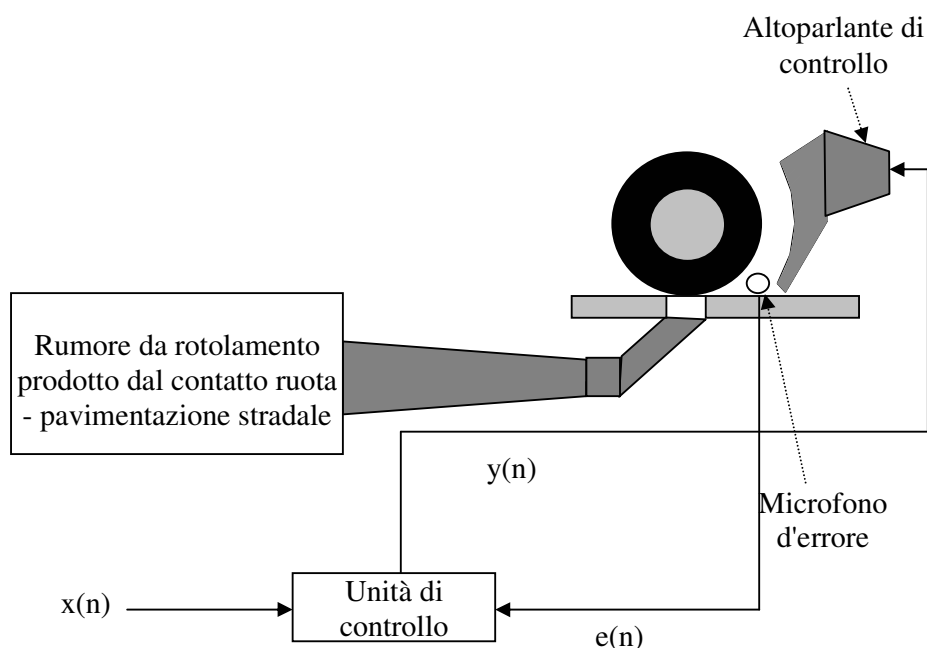
Fig. 7: curva di calibrazione del microfono.

### 3.3 ALGORITMI DI CONTROLLO

Con riferimento alla Fig. 8, l'unità di controllo, in generale, è in grado di realizzare il controllo del rumore elaborando un segnale,  $x(n)$ , che è proporzionale al rumore da rotolamento; questo grazie ad algoritmi adattivi che, in funzione di un segnale d'errore prelevato in corrispondenza del contatto ruota - pavimentazione stradale,  $e(n)$ , consentono di minimizzare il segnale acustico presente.

Il segnale d'errore  $e(n)$  è dato dalla somma (corrispondente ad una differenza essendo i due segnali teoricamente in controfase) tra il rumore da rotolamento e il segnale emesso dall'altoparlante;  $x(n)$  è il rumore, re-

gistrato su DAT, prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale prima di miscelarsi con quello di antirumore.



**Fig. 8:** *schema del banco di prova.*

Non essendo possibile prelevare il segnale di rumore da rotolamento  $x(n)$ , poiché nel punto di contatto risulta già miscelato con il segnale di antirumore, nel caso reale è stato scelto come segnale in ingresso al controllore ANC quello rilevato dal sensore del numero di giri del pneumatico, il quale presenta armoniche alla stessa frequenza di quelle del rumore

---

da rotolamento aventi però fase ed ampiezza differenti da quest'ultimo. Di conseguenza, l'altoparlante di controllo deve emettere un segnale di frequenza uguale a quella del riferimento, ma con diverse fase ed ampiezza tali che il sia minimo il rumore in corrispondenza del punto di contatto ruota – pavimentazione stradale.

Nello svolgimento in laboratorio delle prove sperimentali, è stato scelto come segnale di riferimento lo stesso rumore da rotolamento registrato su DAT.

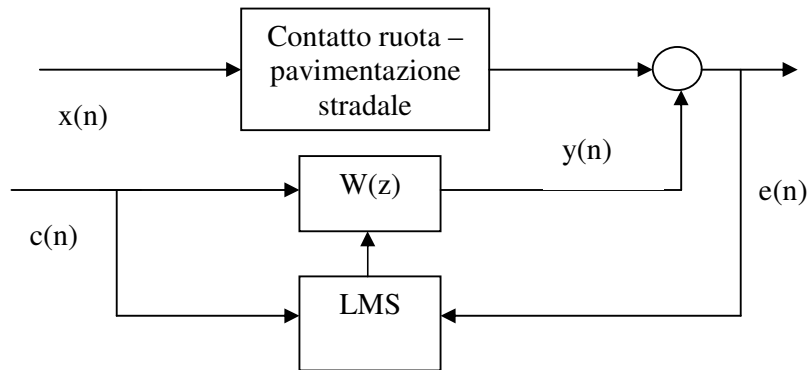
### 3.4 ALGORITMO LMS

Il primo algoritmo utilizzato è l'LMS (Last Mean Square). L'LMS consente al sistema di aggiornarsi in tempo reale in base alle variazioni di frequenza del segnale in ingresso mediante la procedura di seguito riportata. Come da Fig. 9, la funzione di trasferimento FIR  $W(z)$  filtra il segnale di rumore da rotolamento ed i suoi coefficienti sono aggiornati da un algoritmo adattivo LMS. I coefficienti del filtro adattivo sono aggiornati in base alla relazione:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \underline{c}(n) \quad (3.1)$$

dove  $\underline{w}(n)$  rappresenta il vettore dei coefficienti del filtro al passo  $n$ ,  $e(n)$  è il segnale di errore,  $\underline{c}(n)$  rappresenta il vettore dei campioni del-

l'ingresso (segnale di rumore da rotolamento) e  $\mu$  è il parametro di adattamento.



**Fig. 9:** *schema di controllo.*

Per assicurare la convergenza,  $\mu$  deve soddisfare la condizione:

$$0 < \mu < (2 / \text{potenza totale d' ingresso}) \quad (3.2)$$

Per assicurare che  $\mu$  non diventi tanto grande da causare instabilità, può essere scelto un algoritmo LMS normalizzato che utilizza la seguente relazione:

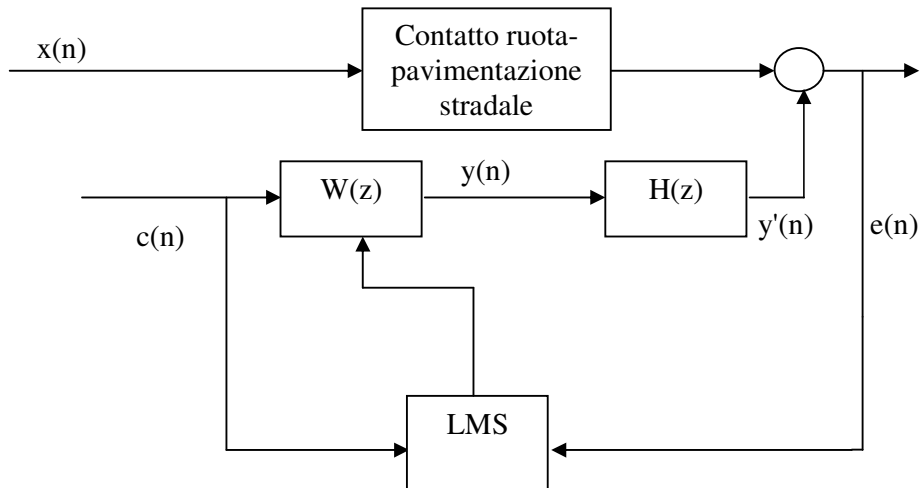
$$\mu = \frac{x}{r + \underline{c}^T(n) \cdot \underline{c}(n)} \quad (3.3)$$

dove  $x$ , dimensione dello step normalizzata, è scelta tra 0 e 2 mentre  $r$  è

un piccolo termine positivo utilizzato per assicurare che i coefficienti aggiornati non diventino eccessivamente grandi quando  $\underline{c}^T(n) \cdot \underline{c}(n)$  è temporaneamente piccolo.

### 3.5 ALGORITMO FxLMS

Il segnale di antirumore  $y(n)$  uscente dal DSP è modificato da un percorso secondario  $H(z)$  nel canale che collega il DSP al microfono di errore tramite gli altoparlanti di controllo. Il sistema diventa allora quello descritto in Fig. 10, dove  $H(z)$  è sconosciuta nonché tempo-variante a causa degli effetti di invecchiamento del sistema e delle variazioni di temperatura.



**Fig. 10:** *schema di controllo LMS che tiene conto della funzione di trasferimento del percorso secondario.*

L'algoritmo LMS è ora espresso nella forma:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \underline{c}(n) \cdot h(n) \quad (3.4)$$

dove  $h(n)$  è la risposta impulsiva del percorso secondario  $H(z)$  la quale dovrà essere stimata in quanto sconosciuta.

Assumendo però che  $H(z)$  sia tempo-invariante, per la sua stima  $S(z)$  può essere utilizzata una tecnica off-line. Al termine di questo procedimento, il modello stimato  $S(z)$  può essere utilizzato per il controllo attivo del rumore. Il sistema di controllo che ne segue prende il nome di Filtered-x LMS (Fig. 11).

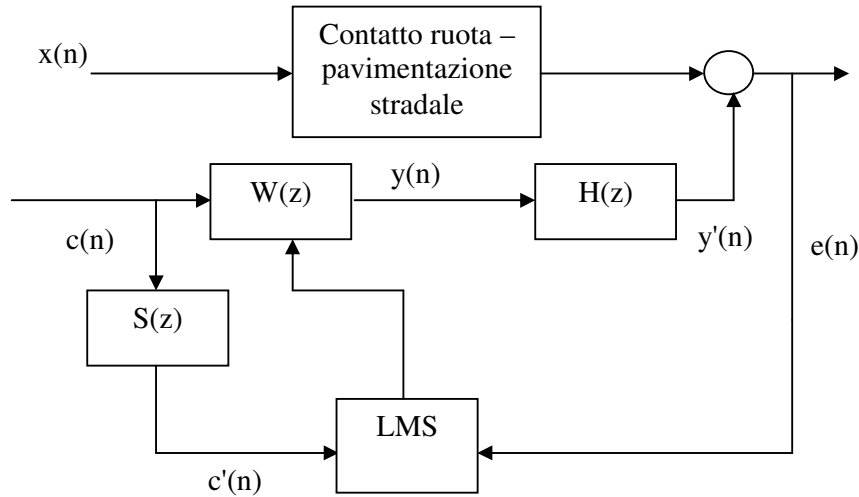
In questo caso i coefficienti di  $W(z)$  sono aggiornati secondo la seguente equazione:

$$\underline{w}(n+1) = \underline{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \underline{c}'(n) \quad (3.5)$$

dove

$$c'(n) = \sum_{i=0}^{M-1} s_i \cdot c(n-i) \quad (3.6)$$

mentre  $\underline{c}'(n) = [c'(n) \ c'(n-1) \ \dots \ c'(n-N+1)]$ .



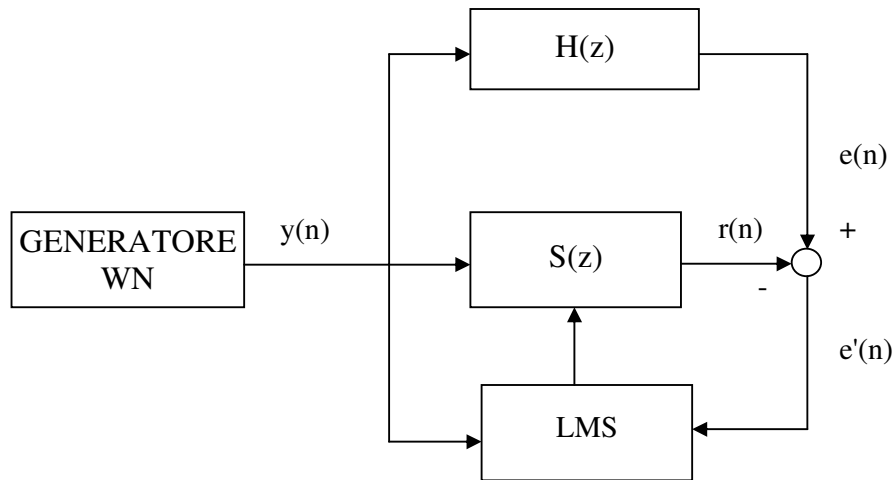
**Fig. 11:** *schema di controllo.*

I coefficienti  $s_i$  rappresentano la funzione di trasferimento del percorso secondario stimato. Per calcolare il loro valore si può generare tramite DSP un rumore bianco WN utilizzandolo come ingresso di riferimento al filtro adattivo  $S(z)$ .

La tecnica di stima di  $S(z)$  è illustrata in figura 12 dove:

$$r(n) = \sum_{i=0}^{M-1} s_i(n) \cdot y(n-i) \quad (3.7)$$

mentre il valore iniziale dei coefficienti  $s_i(n)$  è scelto uguale a zero all'istante iniziale.



**Fig. 12:** schema utilizzato per il calcolo della funzione di trasferimento del percorso secondario.

I coefficienti del filtro adattivo  $S(z)$  sono poi aggiornati utilizzando l'algoritmo LMS nel modo seguente:

$$s_i(n+1) = s_i(n) + \mu \cdot e'(n) \cdot \underline{y}(n-i) \quad \text{per } i = 0, \dots, M-1 \quad (3.8)$$

Il parametro  $\mu$  è scelto tale che

$$0 < \mu < \frac{1}{M \cdot P_y} \quad (3.9)$$

dove  $P_y$  è la potenza del rumore bianco  $y(n)$  e  $M$  l'ordine del filtro  $S(z)$ .

La procedura off-line appena descritta deve essere eseguita per un periodo di circa 10 secondi al termine del quale i coefficienti  $s_i$  ottenuti avranno raggiunto il proprio valore a regime e potranno quindi essere utilizzati nel filtro LMS.

### 3.6 ALGORITMO RLS

Per l'aggiornamento dei coefficienti del filtro FIR è possibile utilizzare, al posto dell' algoritmo adattivo LMS precedentemente descritto, l'RLS; tale algoritmo valuta ricorsivamente la stima dei minimi quadrati dei coefficienti del filtro FIR, basandosi su segnali d'errore e d'ingresso acquisiti.

L'algoritmo RLS può essere espresso in forma matriciale come:

$$\underline{k}(n) = \frac{s \cdot Z(n-1) \cdot \underline{c}(n)}{1 + s \cdot \underline{c}^T(n) \cdot Z(n-1) \cdot \underline{c}(n)}$$
$$\underline{w}(n) = \underline{w}(n-1) + \underline{k}(n) \cdot e(n) \tag{3.10}$$
$$Z(n) = s \cdot (I(n-1) - \underline{k}(n) \cdot \underline{c}^T(n)) \cdot Z(n-1)$$

dove:

- $\underline{c}(n)$  è il vettore dei campioni del rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale;
- $Z(n)$  è la matrice di correlazione inversa, il cui valore iniziale è fissato uguale a  $I \cdot \frac{1}{\sigma^2}$  dove  $\sigma^2$  rappresenta il parametro di stima della varianza dell'ingresso;
- $\underline{k}(n)$  è il vettore dei guadagni;
- $\underline{w}(n)$  è il vettore dei coefficienti del filtro FIR  $W(z)$ ;
- $s^{-l}$  è un fattore di pesatura che tiene conto di quanto rapidamente il filtro “dimentica” le informazioni sui campioni precedentemente acquisiti. Ad esempio, fissare  $s^{-l}=1$  significa avere a disposizione una memoria infinita. Di solito,  $0.95 \leq s^{-l} \leq 1$ ;
- $I(n)$  è la matrice identità ;
- $e(n)$  è l'ultimo campione acquisito del segnale d'errore.

## **4. INDIVIDUAZIONE DELL'ALGORITMO DI CONTROLLO**

### **4.1 SISTEMA DI SVILUPPO**

Gli algoritmi proposti sono stati sviluppati 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, incluse:

- 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.

### **4.2 CONFRONTO FRA GLI ALGORITMI PROPOSTI**

L'algoritmo LMS (Last Mean Square) consente al sistema di ag-

giornarsi in tempo reale in base alle variazioni di frequenza del segnale in ingresso.

Utilizzando l'algoritmo FxLMS, invece, il segnale di antirumore  $y(n)$  uscente dal DSP è modificato da un percorso secondario  $H(z)$  nel canale che collega il DSP al microfono di errore tramite l'altoparlante di controllo.

Infine, per l'aggiornamento dei coefficienti del filtro FIR è possibile utilizzare l'algoritmo adattivo RLS; tale algoritmo valuta ricorsivamente la stima dei minimi quadrati dei coefficienti del filtro FIR, basandosi su segnali d'errore e d'ingresso acquisiti.

Confrontando gli algoritmi LMS e RLS, si può notare che quest'ultimo presenta una maggiore complessità computazionale, conseguentemente sono migliori le prestazioni in termini di attenuazione del segnale d'errore, ma sono maggiori i tempi di calcolo. Ai fini della ricerca in oggetto, l'algoritmo FxLMS è teoricamente quello che fornisce le migliori prestazioni. Nei paragrafi seguenti sono riportati i listati, in linguaggio C, dei programmi relativi ai tre algoritmi adattivi proposti.

### 4.3 ALGORITMO LMS

```
/* 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 0x2000 // 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 mu 0.000000000000007
#define num 61

float riferimento [num];
float y;
float Q[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 */
```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
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 */
}
```

---

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
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
update 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;

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

    if (fabs(y>16000.0))           //evita la saturazione
        y=y*0.00001;

    tx_buf[1]=y; //invia un campione in uscita
}
```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
for (i=0;i<=num-1;i++) {
Q[i]=Q[i]+mu*rumore*riferimento[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-
dress */
    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.

```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafango elettronico*

---

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

}

#### 4.4 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 mul 0.00000000000004
#define mu 0.000000000000007
#define num 61
#define tt 0.00025
float riferimento[num];
float y,c1,t,e,wn,wf,el;
```

---

```
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 multitprocessing */
    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 update 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*/
e=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;
e1=(e-wf);
for (i=0;i<=num-1;i++) {
S[i]=S[i]+mul*e1*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   princi-
        pale*/

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

---

```
    tx_buf[1]=y;
    c1=0;

for (p=0;p<=num-1;p++) {
c1=c1+ riferimento[p]*1000*S[p];} /*c1=segnale riferimento
                                filtrato dalla funzione
                                di trasferimento*/

for (p=num-1;p>0;p--) {
    rif[p]=rif[p-1];}
rif[0]=c1;

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 */
```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
    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-
dress          */

    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();
};
}
```

#### 4.5 ALGORITMO RLS

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

---

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
#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 s 1.03
#define num 4
#define sig 0.01

float riferimento[num];
float y,e,u;
int i,j;
float W[num],Z[num][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 */
```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
    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 update count.
        tx_buf[0] = *xmit_ptr++;
        xmit_count--;
    }
}
```

---

```

/*****
/* Periodic timer interrupt
*****/
void timer_hi_prior( int sig_num )
{
    int p;
    float x[num],k[num];

    e=rx_buf[2]; //acquisizione segnale d'errore
    u=rx_buf[1]; //acquisizione segnale riferimento
    for (p=num-1;p>0;p--) { // creazione vettore c
        riferimento[p]= riferimento[p-1];};
    riferimento[0]=u;

    y=0;
    for (p=0;p<=num-1;p++) { //y=segnale riferimento filtrato
        y=y+riferimento[p]*W[p];};
    tx_buf[1]=y;

    for (p=0;p<=num-1;p++) {
        x[p]=0;};

    for (i=0;i<=num-1;i++) {
        for(j=0;j<=num-1;j++) { //x = s*Z[][]*c[]
            x[i]=x[i]+s*(Z[i][j]*riferimento[j]);
        };
    };
}

```

```
for (i=0;i<=num-1;i++) {
k[i]=x[i]/(1+ riferimento[i]*x[i]); }; // calcolo vettore k

for (i=0;i<=num-1;i++) {
for(j=0;j<=num-1;j++) { //calcolo matrice Z[][]
Z[i][j]=s*Z[i][j]-k[i]*x[j];};
};

for (i=0;i<=num-1;i++) {
W[i]=W[i]+k[i]*e;}; //aggiornamento coefficienti filtro FIR
}

/*****
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 )
{
```

*Sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento: parafrango elettronico*

---

```
// 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++) { riferimento[i]=0;};
for(i=0;i<=num-1;i++) { W[i]=0;};
for(i=0;i<=num-1;i++) {
for(j=0;j<=num-1;j++) {
if (i!=j)
Z[i][j]=0;
else
Z[i][j]=sig;
};
};
interrupt(SIG_TMZ0, timer_hi_prior);
// Loop forever.
for(;;)
{
idle();
};
}
```



## **5. PROGETTO DEL PARAFANGO ELETTRONICO**

Poiché la calibrazione, l'ottimizzazione e la verifica del sistema di controllo attivo del rumore sono molto difficili in condizioni di movimento del veicolo, nell'ambito della ricerca in oggetto, è stato progettato un prototipo statico da laboratorio avente lo scopo di simulare il fenomeno delle emissioni acustiche da rotolamento in condizioni statiche.

Il prototipo è costituito da un parafango elettronico operante su un sistema fisico equivalente ruota – pavimentazione stradale nel quale il rumore da rotolamento è riprodotto mediante un registratore digitale. Il prototipo può riprodurre alternativamente sia il rumore da compressione, dovuto alla parte anteriore della ruota che si accinge al contatto con la superficie, che quello di rarefazione, dovuto alla parte posteriore della ruota che abbandona il contatto con la superficie.

Le prove su tale prototipo consentono di determinare le condizioni ottimali per il funzionamento reale quali: individuazione della geometria ottimale del parafango, scelta dell'algoritmo di calcolo da implementare nell'unità di controllo, calibrazione dell'algoritmo.

### **5.1 IL BANCO DI PROVA**

Al fine di realizzare e provare il sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento, è stato realizzato un banco di prova avente lo scopo

di riprodurre in laboratorio le emissioni acustiche prodotte dal contatto ruota – pavimentazione stradale.

Il banco di prova è costituito da un adattatore di impedenza acustica che collega il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale con una cassa acustica nella quale viene generato il rumore da rotolamento.

L'adattatore di impedenza è stato realizzato in acciaio Inox utilizzando una lastra di spessore 1 mm (massimo spessore che consente di realizzare la forma conica desiderata); la struttura ottenuta (foto in Fig. 13), grazie all'utilizzo di due flangie circolari alle terminazioni, può essere connessa al terminale di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale, alla cassa acustica e all'altoparlante che invia il segnale di rumore.

Inoltre è stata progettata, una cassa acustica chiusa di forma parallelepipedica in acciaio Inox per ridurre l'effetto dell'onda prodotta dall'altoparlante di rumore verso l'esterno.

L'altoparlante è inserito al centro di una faccia della cassa tramite un'apposita flangia.

Le dimensioni della struttura sono 57.8 cm X 37.8 cm X 48 cm come è indicato in Fig. 14 (foto in Fig. 15).

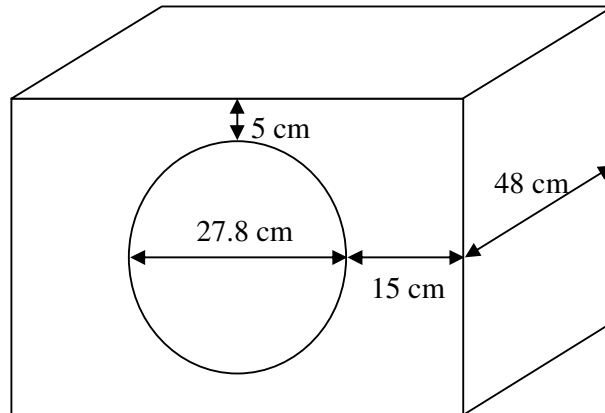
La cassa acustica, riempita al suo interno di materiale fonoassorbente (lana di roccia), è stata poi rinforzata esternamente per limitare le vibrazioni delle sue pareti alle basse frequenze.



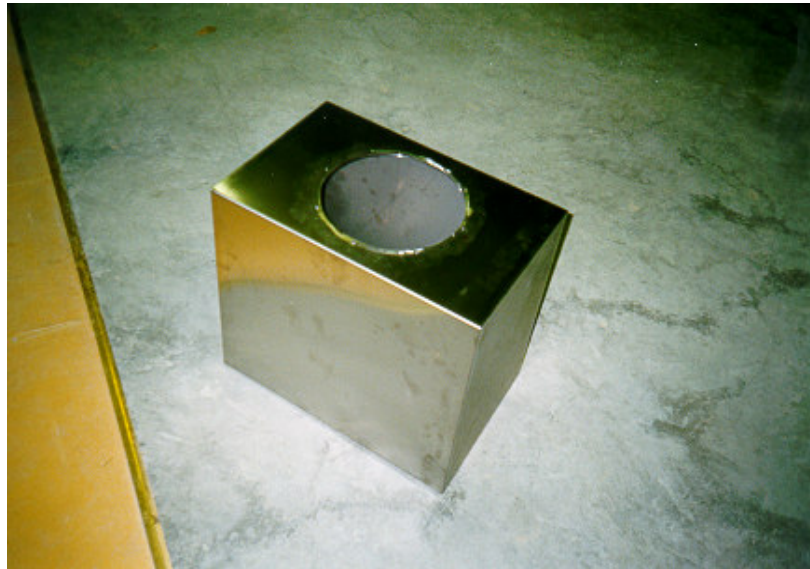
**Fig. 13:** *fotografia dell'adattore di impedenza.*

I vari componenti del sistema banco di prova sono stati poi collegati fra loro utilizzando le flange presenti e isolando acusticamente le giunzioni mediante silicone ad alta temperatura.

Il banco di prova è quello rappresentato nella foto di Fig.16. L'altoparlante impiegato (vedi foto in Fig. 17) per la generazione del rumore è il SONORA H776 di potenza nominale 200W e superficie del diaframma di diametro 27.8 cm.



**Fig. 14:** *struttura della cassa acustica.*

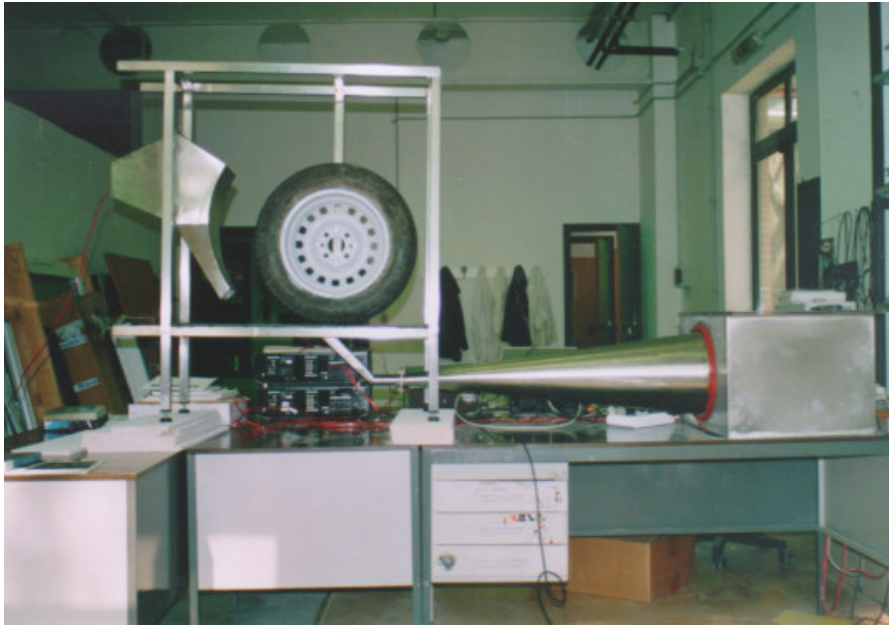


**Fig. 15:** *fotografia della cassa.*

## 5.2 FUNZIONAMENTO DEL BANCO DI PROVA

Per la determinazione delle caratteristiche acustiche del banco di prova sono state eguagliate le impedenze corrispondenti alla tromba conica e al tubo di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale così da realizzare un adattamento di impedenza.

Al tubo di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale corrisponde un'induttanza di valore



**Fig. 16:** *fotografia del banco di prova.*

$$L_R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (5.1)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'aria, S l'area della sezione del tubo di raccordo (supposto, per semplicità di calcolo, circolare, di raggio 0.015 m, per tutta la sua lunghezza) ed l è la sua lunghezza equivalente.

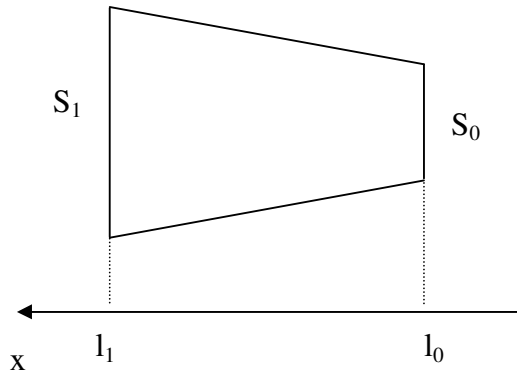
Quest'ultima si considera uguale alla lunghezza del tratto del tubo dritto (0.34 m) più la lunghezza equivalente corrispondente alla curva che lo caratterizza (0.4 m).



**Fig. 17:** *fotografia dell'altoparlante.*

Per quanto riguarda invece il calcolo dell'impedenza della tromba di forma conica, in base alla Fig. 18, l'andamento della sezione in funzione della coordinata  $x$  è del tipo:

$$S(x) = M \cdot x^2 \quad (5.2)$$



**Fig. 18:** schema della vista laterale della tromba di forma conica.

Detta  $v(x)$  la velocità delle particelle sulla sezione corrispondente all'ascissa  $x$ , l'energia cinetica del gas nel tratto  $dx$  è:

$$dW_c = v^2(x) \cdot \frac{dm}{2} = \frac{q^2}{S^2(x)} \cdot \frac{dm}{2} \quad (5.3)$$

dove  $q$  rappresenta la portata acustica mentre l'elemento di massa  $dm$  è  $\rho \cdot S(x) \cdot dx$ .

Si può quindi ottenere l'energia cinetica totale che caratterizza il tronco di cono integrando l'espressione di  $dW_c$  tra  $l_0$  e  $l_1$ :

$$W_c = \int_{l_0}^{l_1} \frac{\rho \cdot S(x) \cdot q^2}{2 \cdot S^2(x)} dx = \frac{\rho \cdot q^2}{2 \cdot M} \cdot \left( \frac{l}{l_0} - \frac{l}{l_1} \right) \quad (5.4)$$

Poiché, dalla (5.2) segue che  $M \cdot l_i^2 = S_i$  per  $i = 1, 2$  si ricava la seguente espressione:

$$W_c = \frac{\rho \cdot q^2}{2 \cdot \sqrt{M}} \cdot \left( \frac{l}{\sqrt{S_0}} - \frac{l}{\sqrt{S_1}} \right) \quad (5.5)$$

Eguagliando la (5.5) a quella dell'energia cinetica di un'inertanza, cioè:

$$W_c = \frac{I}{2} \cdot L \cdot q^2 \quad (5.6)$$

si ottiene che la tromba conica presenta un'impedenza puramente induttiva uguale a:

$$L_C = \frac{\rho}{\sqrt{M}} \cdot \left( \frac{l}{\sqrt{S_0}} - \frac{l}{\sqrt{S_l}} \right) \quad (5.7)$$

dove  $S_0$  e  $S_l$  sono le aree delle sezioni estreme del tronco di cono, quindi di forma circolare, i cui raggi sono noti e corrispondono rispettivamente a quello del tubo di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale (0.015 m) e a quello dell'altoparlante (0.139 m).

Per adattare l'impedenza della tromba conica a quella del tubo di raccordo è necessario ora imporre l'uguaglianza tra le espressioni (5.1) e (5.7).

Dall'equazione  $L_C = L_R$ , si ricava il valore di  $\sqrt{M}$  che permette di realizzare un perfetto adattamento. Si ottiene  $\sqrt{M} = 0.032$ .

Sapendo che, dalla (5.2),  $M \cdot l_l^2 = \pi \cdot (0.139)^2$  e  $M \cdot l_0^2 = \pi \cdot (0.015)^2$ , si ricava che la lunghezza del tronco di cono che produce l'adattamento di impedenza è la seguente:

$$l_l - l_0 = \sqrt{\frac{\pi}{M}} \cdot (0.124) = 6.87 \text{ m} \quad (5.8)$$

Essendo tale valore troppo elevato per problemi d'ingombro si è optato quindi per una lunghezza di 1 m per l'adattatore di impedenza, risolvendo gli ovvi problemi d'ingombro che seguirebbero ad una scelta ideale

---

di  $l_1 - l_0$ , ottenendo un'induttanza per il tronco di cono uguale a circa 0.14 volte quella del tubo di raccordo con una perdita di circa 9 dB, che saranno compensati fornendo una maggiore potenza all'altoparlante.

### 5.3 CARATTERIZZAZIONE ACUSTICA DEL BANCO DI PROVA

Per verificarne il funzionamento, è stato individuato un circuito equivalente elettrico dell'intero banco di prova utilizzato.

Nella Fig. 19 si riporta il circuito equivalente della cassa acustica del banco di prova e del cono di adattamento.

La cassa acustica è modellata dai seguenti componenti elettrici: il generatore di tensione  $E_r$  rappresenta il segnale acustico prodotto dall'altoparlante,  $R_g$  è la sua resistenza interna mentre  $R_e$  è la resistenza elettrica della bobina mobile; i componenti del parallelo RLC possono essere calcolati come:

$$C_{cm} = \frac{L_{as} \cdot S_D^2}{B^2 \cdot l_b^2} = 0.0099 \left[ \frac{m^4 \cdot s^2}{kg} \right] \quad (5.9)$$

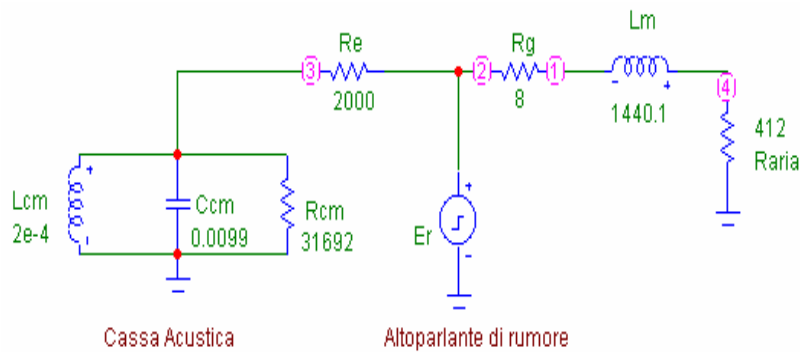
$$L_{cm} = \frac{C_{as} \cdot B^2 \cdot l_b^2}{S_D^2} = 0.0002 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (5.10)$$

$$R_{cm} = \frac{B^2 \cdot l_b^2}{S_D^2 \cdot R_{as}} = 31692 \left[ \frac{kg}{m^4 \cdot s} \right] \quad (5.11)$$

dove  $R_{as}$ ,  $C_{as}$  e  $L_{as}$  rappresentano rispettivamente resistenza, capacità e induttanza associate alla cassa acustica,  $S_D$  è la superficie del diaframma dell'altoparlante,  $B$  e  $l_b$  sono induzione magnetica e lunghezza del filo conduttore costituente la bobina.

Il cono ed il condotto terminale di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale sono invece modellati da un'induttanza calcolata con la seguente equazione:

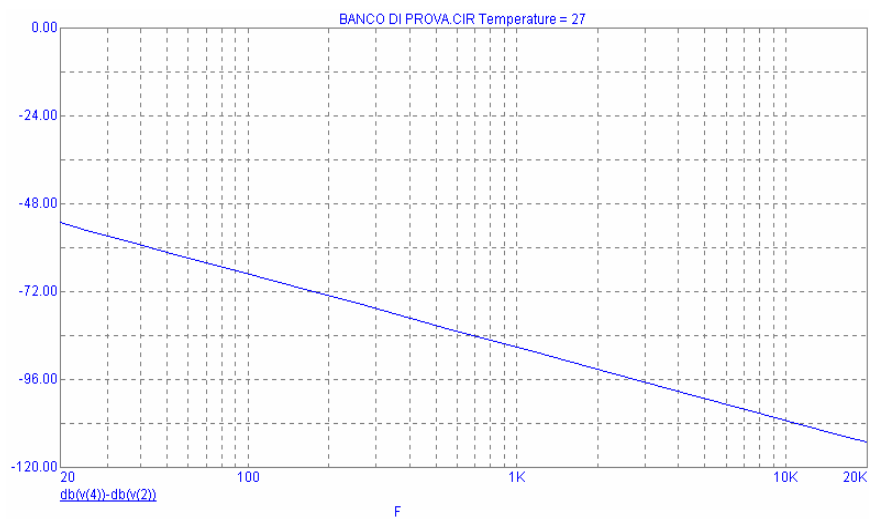
$$L_m = \frac{\rho}{\sqrt{M}} \cdot \left( \frac{l}{\sqrt{S_0}} - \frac{l}{\sqrt{S_1}} \right) + \frac{\rho \cdot l_m}{S_0} = 1440.1 \left[ \frac{kg}{m^4} \right] \quad (5.12)$$



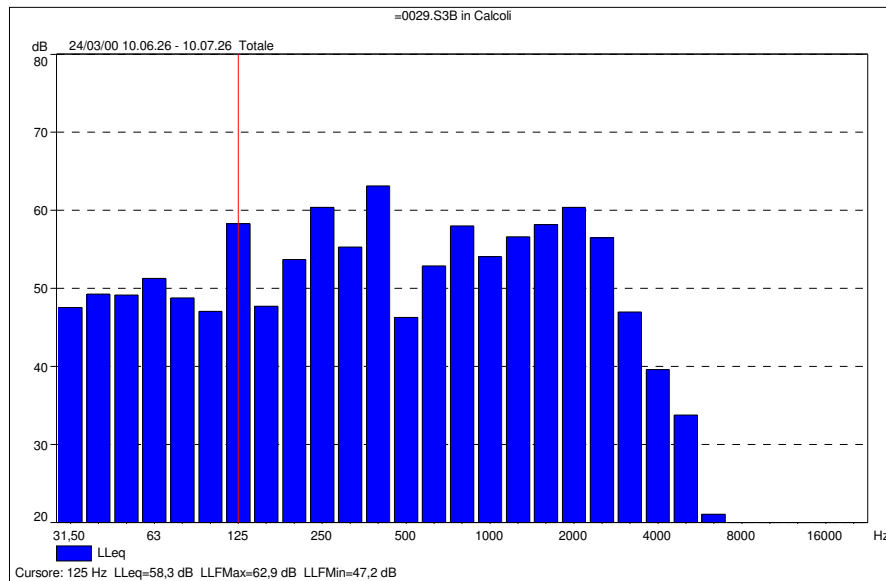
**Fig. 19:** circuito equivalente del banco di prova.

In Fig. 20 è riportata la risposta in frequenza del banco di prova utilizzato che, all'interno della banda acustica, presenta un comportamento di tipo passa basso.

In Fig. 21 è riportata l'analisi in bande da 1/3 d'ottava ottenuta dopo aver acquisito il segnale di rumore mediante il fonometro Investigator 2260 della B&K; anche in questo caso si nota la presenza di una componente fondamentale a 125 Hz e di altre armoniche determinate dalla presenza del banco di prova.



**Fig. 20:** *funzione di trasferimento del circuito equivalente del banco di prova.*



**Fig. 21:** *spettro del rumore in uscita al banco di prova.*

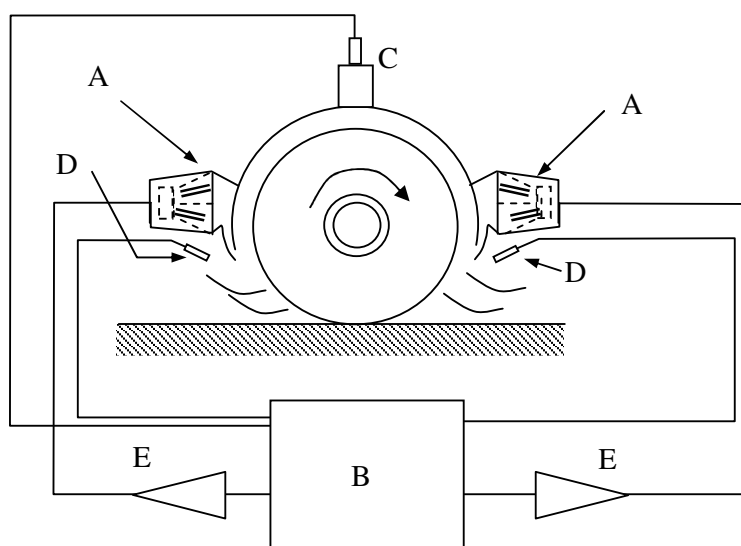
#### 5.4 PROGETTO DEL PARAFANGO ELETTRONICO

Il sistema di controllo attivo proposto per l'attenuazione del rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale è schematizzato in figura 7.10.

Tale sistema è composto dai seguenti elementi:

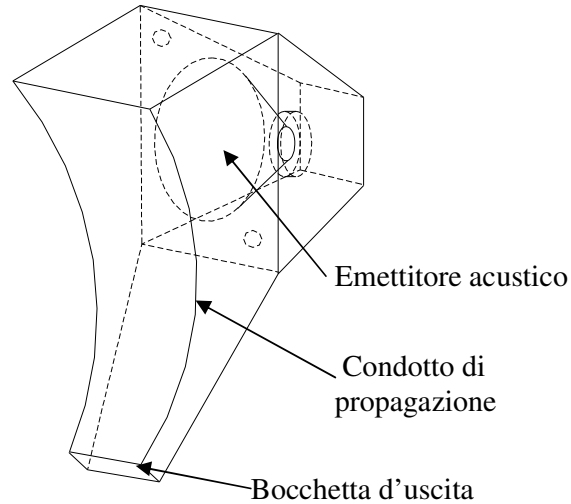
- A. due emettitori acustici;
- B. unità di controllo;

- C. sensore per il rilevamento del numero di giri del pneumatico per unità di tempo;
- D. due microfoni di errore;
- E. due amplificatori di potenza.



**Fig. 22:** *sistema di controllo attivo del rumore da rotolamento.*

Come mostrato in Fig. 23, ciascun emettitore acustico è costituito da un condotto di sezione variabile, che termina con una bocchetta d'uscita.



**Fig. 23:** *emettitore acustico del sistema di controllo attivo.*

L'altoparlante è installato all'interno dell'emettitore acustico in corrispondenza della parte superiore del condotto; così le onde sonore prodotte dall'altoparlante si propagano attraverso il condotto fino a raggiungere la bocchetta d'uscita. L'altoparlante è racchiuso da una cassa acustica riempita di materiale fonoassorbente in modo da eliminare gli effetti indesiderati dovuti alla radiazione sonora emessa dal lato posteriore del diaframma. Il volume d'aria contenuto all'interno della cassa è collegato al condotto di propagazione attraverso due fori per aumentare le prestazioni dell'altoparlante a bassa frequenza. Lo spessore delle pareti dell'emettitore acustico, realizzato in acciaio INOX, è pari a 2 mm; ciò

acustico, realizzato in acciaio INOX, è pari a 2 mm; ciò permette di minimizzare la trasmissione delle onde acustiche attraverso le pareti. La forma dell'emettitore acustico è simile a quella di un comune parafango così da agevolarne l'installazione su veicolo.

L'unità di controllo è basata su un DSP che elabora i segnali in ingresso per ottenere due segnali di controllo rispettivamente per il rumore di compressione e quello di dilatazione dell'aria. L'ampiezza del segnale di controllo è proporzionale, ma opposta, a quella del rumore da rotolamento. I segnali in ingresso sono il numero di giri del pneumatico e due segnali di errore: il primo è ottenuto per mezzo di un sensore ottico installato sul mozzo del pneumatico, il secondo ed il terzo sono ottenuti per mezzo di due microfoni installati come indicato in Fig. 22.

L'amplificatore è alimentato dai due segnali di controllo e garantisce ai due emettitori acustici una potenza sufficiente per realizzare il controllo. Il rumore da rotolamento interferisce con il segnale di controllo di uguale ampiezza, ma segno opposto, nello spazio che separa il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale con la bocchetta d'uscita dell'emettitore acustico; il risultato è una riduzione del rumore complessivo.

## **6. REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO**

Allo scopo di simulare il fenomeno delle emissioni acustiche da rotolamento in condizioni statiche, è stato realizzato un prototipo statico da laboratorio.

Il prototipo è costituito da un parafango elettronico operante su un banco di prova, costituito da un sistema fisico equivalente ruota – pavimentazione stradale, nel quale il rumore da rotolamento viene riprodotto mediante un registratore digitale.

Il rumore registrato viene immesso in corrispondenza del punto di contatto ruota – pavimentazione stradale; nel sistema sperimentale utilizzato, il pneumatico è fermo e la pavimentazione stradale è realizzata utilizzando una lastra piana ricoperta da una pellicola di materiale simile ad asfalto. In questo modo è possibile riprodurre la geometria dell'ambiente nel quale è immesso il reale rumore da rotolamento.

Il pneumatico ed il parafango elettronico sono fissati ad un telaio in acciaio Inox; la possibilità di regolare la posizione sia della ruota che del parafango elettronico ha consentito di individuare la geometria ottimale della struttura.

La generazione del segnale di antirumore è garantita da un altoparlante alloggiato nel corpo del parafango elettronico.

L'altoparlante è alimentato da un amplificatore comandato dall'unità di controllo (vedi capitolo 3).

All'esterno è stata costruita una cassa acustica riempita di materiale fonoassorbente che consente di incrementare l'efficienza dell'altoparlante e di limitare le emissioni verso l'esterno.

Durante le fasi di prova e collaudo il parafango elettronico verrà collegato al banco di prova che simula il comportamento acustico del rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale.

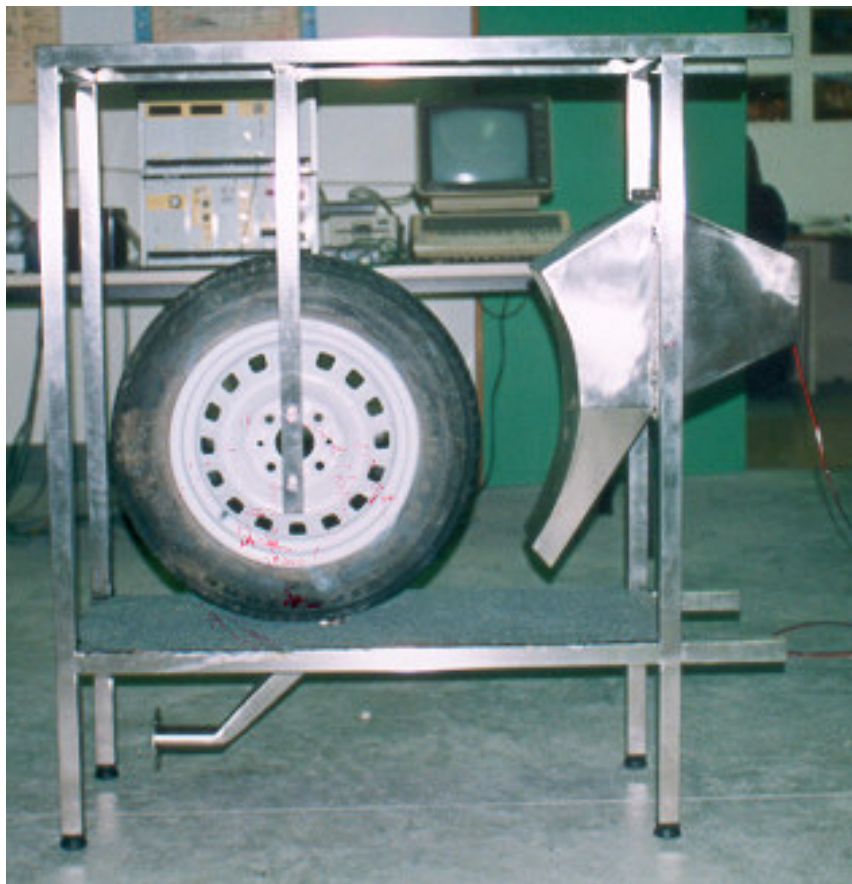
## 6.1 CARATTERISTICHE MECCANICHE

Il dispositivo è stato realizzato con lamiera in acciaio Inox dello spessore di 2 mm; tale valore garantisce un elevato isolamento fra la cavità interna del parafango elettronico 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 geometria reale del veicolo al fine di consentire un'eventuale installazione del prototipo sul veicolo stesso.

Come si può notare dalla fotografia in Fig. 24, il prototipo realizzato e la ruota sono stati fissati ad un telaio in acciaio Inox di dimensioni 36 cm x 102 cm x 114 cm. Il pneumatico (tipo: Firestone F-570 , dimensioni: 135 R 13 69T) può essere avvicinato o allontanato al parafango elettronico mediante movimenti orizzontali; il prototipo può essere regolato in di-

verse posizioni sia lungo l'asse verticale che orizzontale. Provando le diverse combinazioni, è stata individuata la geometria ottimale del parafango.



**Fig. 24:** *fotografia del sistema sperimentale statico.*

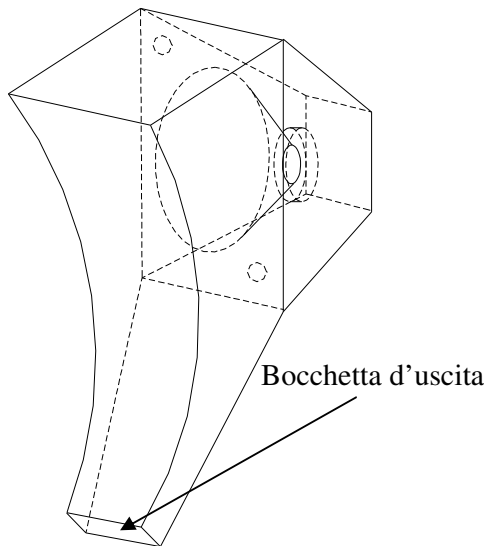
Nel sistema sperimentale realizzato il pneumatico poggia su una sottile lastra piana, di dimensioni 36 cm x 87 cm, ricoperta da una pellicola di materiale simile ad asfalto.

In corrispondenza del punto di contatto ruota – lastra piana, è presente un’apertura di dimensioni 10 cm x 4 cm attraverso la quale viene inviato un segnale registrato che riproduce il rumore da rotolamento.

Tramite un condotto di raccordo, di sezione variabile, l’apertura rettangolare viene collegata alla flangia d’uscita del banco di prova utilizzato per riprodurre il segnale da rotolamento.

Il parafango elettronico ha lo scopo di realizzare uno stretto accoppiamento acustico tra la sorgente primaria di rumore (il contatto ruota – strada) e la sorgente secondaria artificiale di antirumore (altoparlante). A tale scopo il prototipo ha una particolare forma (Fig. 25) che consente il montaggio di un altoparlante, dotato di cassa acustica, con varie orientazioni a seconda delle esigenze di ingombro ed è provvista di un’apertura verso il basso che consente il passaggio delle onde sonore. La bocchetta d’uscita presenta una forma rettangolare di dimensioni 15 cm x 4 cm.

La posizione del parafango, e quindi della sua parte terminale inferiore, può essere variata in modo da avvicinarlo al punto di contatto ruota – pavimentazione stradale in modo da migliorare l’accoppiamento acustico tra rumore ed antirumore.



**Fig. 25:** *disegno meccanico del parafango elettronico.*

La posizione del parafango, e quindi della sua parte terminale inferiore, può essere variata in modo da avvicinarlo al punto di contatto ruota – pavimentazione stradale in modo da migliorare l'accoppiamento acustico tra rumore ed antirumore.

Il segnale di antirumore, generato dall'altoparlante di controllo, viene inizialmente convogliato all'interno di una cavità di volume  $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , in seguito viene inviato in uscita ed è emesso attraverso la bocchetta prima descritta.

La cassa acustica, che contiene l'altoparlante, ha la forma di un tronco di piramide a base rettangolare di dimensioni:

- base maggiore            25 x 29 cm,
- base minore             16.5 x 11.3 cm,
- altezza                    21.2 cm.

Sono stati praticati due fori, del diametro di 2 cm, che mettono in comunicazione il volume della cassa acustica direttamente con la cavità iniziale del parafrangente elettronico. Tale intervento permette di aumentare l'efficienza dell'altoparlante stesso poiché si incrementa la cedevolezza del sistema elastico costituito dall'aria e dalla membrana del cono.

L'aumento della cedevolezza ha come conseguenza indesiderata l'innalzamento della frequenza di risonanza del sistema con un rendimento ridotto alle basse frequenze.

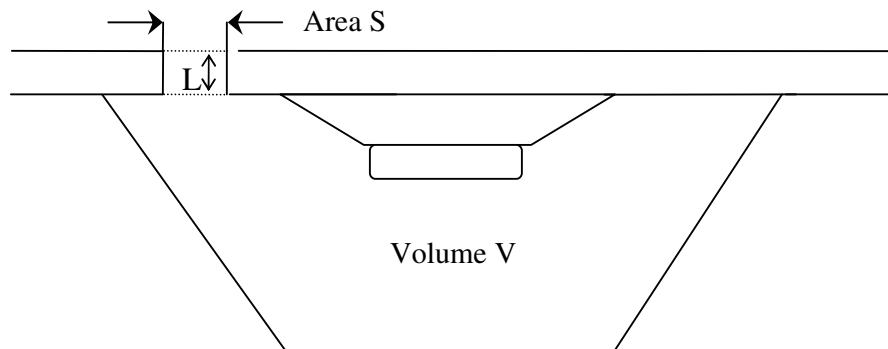
Il sistema ottenuto è quello di Fig. 26 dove si può pensare che l'aria contenuta nel foro sia una massa oscillante, mentre quella della cavità costituente la cassa agisca come molla di richiamo.

La struttura può quindi essere assimilata ad un risonatore di Helmholtz avente come frequenza di risonanza:

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot L_e}} \quad (6.1)$$

dove:

- $S$  è l'area del foro;
- $L_e$  è la lunghezza equivalente del foro, vale a dire  $L+0.8*D$  ( $D$  è il diametro del foro);
- $V$  è il volume della cassa acustica.



**Fig. 26:** *schema della cassa acustica del parafango elettronico.*

I valori scelti sono tali da rendere il valore di  $f_r$  uguale a quello della frequenza di risonanza meccanica dell'altoparlante.

La scelta dell'altoparlante impiegato nel parafango elettronico è stata effettuata in base alle seguenti considerazioni: il sistema di controllo attivo del rumore deve prevedere che la sorgente secondaria generi una potenza uguale a quella primaria. Si ricorda che la potenza di un altoparlante specificata dai costruttori è definita usualmente come la massima potenza elettrica media che può essere inviata su di esso senza che si veri-

fichino danneggiamenti o che la distorsione non lineare superi un limite prefissato.

Poiché è stato rilevato, in corrispondenza del punto di contatto ruota – pavimentazione stradale, un livello di intensità acustica di circa 102 dB corrispondente ad un valore di intensità uguale a

$$I = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{102}{10}} = 0.015 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (6.2)$$

ed ipotizzando, per comodità, una propagazione di tipo sferica dal punto di contatto al punto di misura, si ricava come potenza della sorgente un valore di

$$W = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot I = 0.188 W \quad (6.3)$$

Essendo il rendimento elettrico di un altoparlante (rapporto tra potenza acustica prodotta e potenza elettrica di alimentazione) generalmente molto piccolo (compreso di solito tra lo 0.2% e il 2%), ipotizzando il caso peggiore di un rendimento dello 0.2%, la potenza nominale richiesta è

$$W_e = 0.188 \cdot \frac{1000}{2} = 94 W \quad (6.4)$$

In seguito a queste considerazioni è stata adottata la scelta di un altoparlante della potenza di 150 W, in modo da poter generare un segnale di antirumore di ampiezza opportuna ai fini della cancellazione del segnale di rumore.



## **7. INSTALLAZIONE E COLLAUDO DEL PROTOTIPO**

### **7.1 INSTALLAZIONE E COLLAUDO**

Il parafango elettronico ed il sistema di controllo sono stati collegati con il banco di prova allo scopo di calibrare, tarare l'intero sistema e verificarne le prestazioni.

A tale proposito è stata condotta una campagna di misure fonometriche nelle immediate vicinanze del punto di contatto ruota – pavimentazione stradale.

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 è stata effettuata sostituendo il rumore da rotolamento con un tono puro, in modo da testare il sistema di controllo alle varie frequenze.

Una seconda serie di misure è stata effettuata assimilando il rumore prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale con un segnale acustico avente una forma quadra.

Una terza serie di misure è stata, invece, condotta inviando al banco di prova il rumore da rotolamento registrato.

## 7.2 STRUMENTAZIONE FONOMETRICA

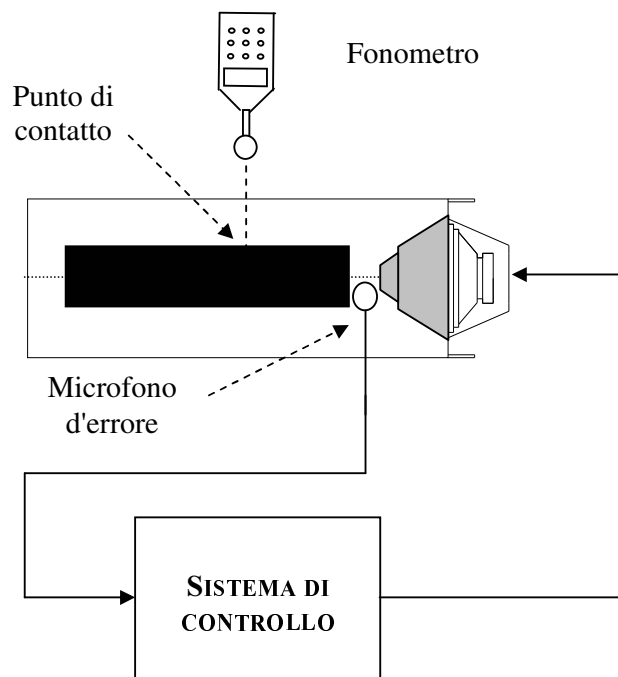
Il fonometro utilizzato è l'Investigator modello 2260 prodotto dalla Bruel & Kjaer avente le seguenti caratteristiche:

- 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  $1 \text{ V/Pa}$ , capacità  $14 \text{ pF}$  (a  $250 \text{ Hz}$ );
- 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  $20^\circ\text{C}$ ) sono  $2 \text{ dB}$  a  $1 \text{ KHz}$ ,  $8 \text{ dB}$  a  $10 \text{ KHz}$  (bande in terzo d'ottava) e  $6 \text{ dB}$  a  $1 \text{ KHz}$ ,  $12 \text{ dB}$  a  $8 \text{ KHz}$  (bande d'ottava);
- dinamica di misura è pari a  $90 \text{ dB}$  (bande d'ottava ed in terzo d'ottava) e a  $80 \text{ dB}$  (ponderato A).

## 7.3 MODALITÀ DI MISURA

La campagna di misure fonometriche è stata condotta posizionando

il microfono del fonometro a 50 cm dal punto di contatto ruota – pavimentazione stradale, come indicato in Fig. 27.



**Fig. 27:** *disposizione della strumentazione per la campagna delle misure.*

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 su tutta la banda acustica del rumore prodotto in uscita al parafango elettronico; inoltre, è stato analizzato lo spettro del rumore valutando il  $Leq$  per ciascuna banda in terzi d'ottava.

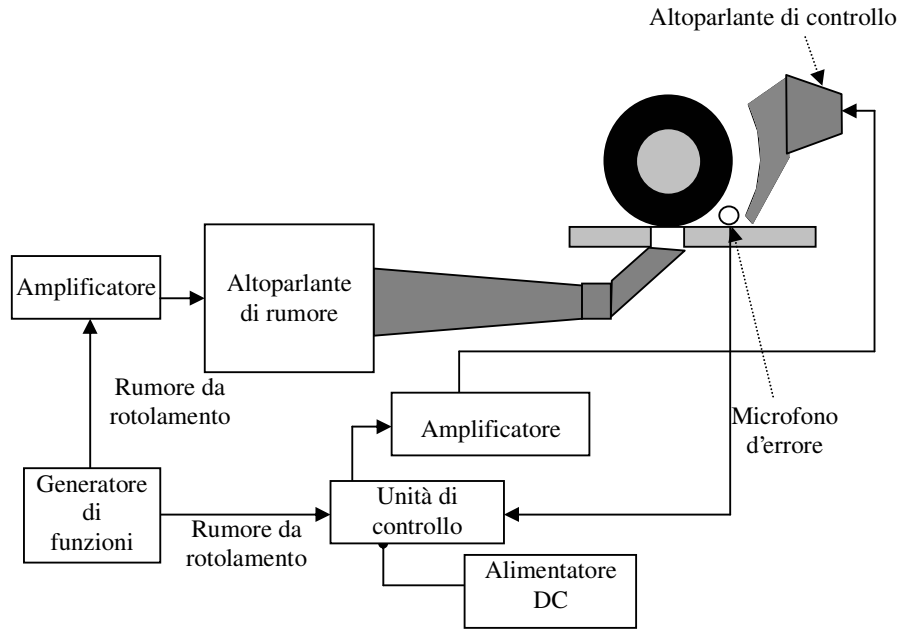
#### 7.4 PRIMA SERIE DI MISURE

La prima serie di misure è stata condotta utilizzando un'onda sinusoidale inviata sia all'amplificatore di rumore, sia al DSP. Così facendo, il DSP può disporre di un segnale di sincronismo la cui funzione è equivalente al segnale rilevato dal sensore del numero di giri del pneumatico nel funzionamento definitivo. Il segnale è stato generato mediante un generatore di funzioni.

La frequenza è stata variata in modo da verificare la capacità del DSP di regolare automaticamente il segnale di antirumore al variare della frequenza del rumore

Lo schema a blocchi del sistema di controllo utilizzato nelle prove sperimentali è descritto in Fig. 28.

In tabella 3 sono riportate le prove sperimentali effettuate e, di seguito (figure 29, 30, ..., 42), i grafici dello spettro del rumore acquisito mediante fonometro.



**Fig. 28:** *schema a blocchi del sistema di controllo utilizzato nella prima serie.*

Analizzando gli spettri in bande in terzi di ottava ottenuti generando un tono sinusoidale di frequenza fondamentale 250 Hz, si nota come l'uso dell'algoritmo adattivo riduca di circa 15 dBA il  $Leq$  ponderato A rispetto al caso in cui il sistema di controllo è spento; una riduzione analoga si ha nel caso di un tono puro a 500 Hz.

In generale si constata il funzionamento del sistema di controllo attivo anche per frequenze più basse (fino a 63 Hz) e più alte (fino a 1000 Hz) ma con riduzioni minori del livello sonoro. A frequenze superiori, come

evidenziato dai risultati ottenuti a 2000 e 4000 Hz, non è garantito il funzionamento del sistema di controllo.

Il parametro di adattamento è stato scelto cercando di raggiungere un compromesso tra velocità di convergenza e stabilità.

**Tabella 3:** *risultati della prima serie di misure.*

frequenza onda sinusoidale (Hz)	senza controllo		con controllo	
	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello equivalente lineare dB)	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello e- quivalente lineare dB)
63	63.5	87.4	60.8	81.8
125	68.5	83.8	64.4	79.3
250	85.1	93.6	70.8	78.8
500	90.9	94.4	76.5	79.9
1000	101.3	101.1	99.6	99.4
2000	91.2	90.0	96.2	95.0
4000	69.2	72.0	74.2	74.3

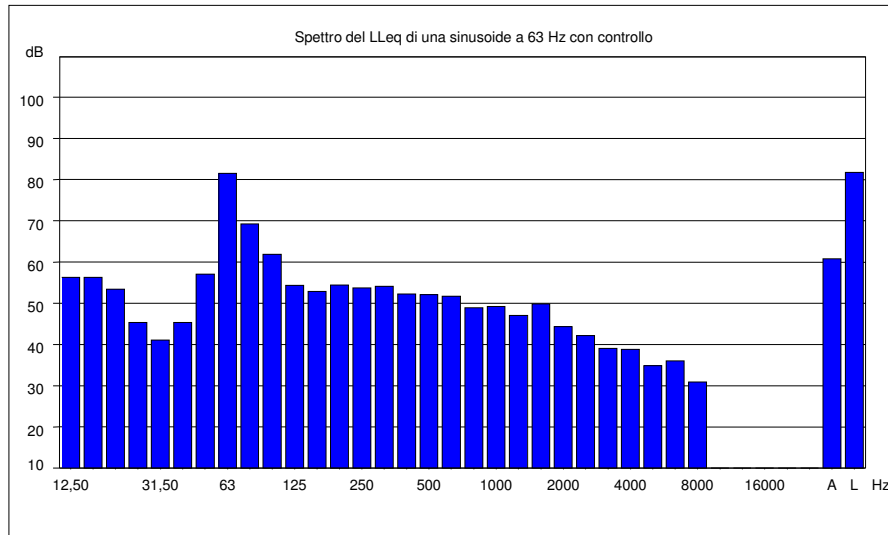


Fig. 29: spettro del Leq di una sinusoide a 63 Hz con controllo.

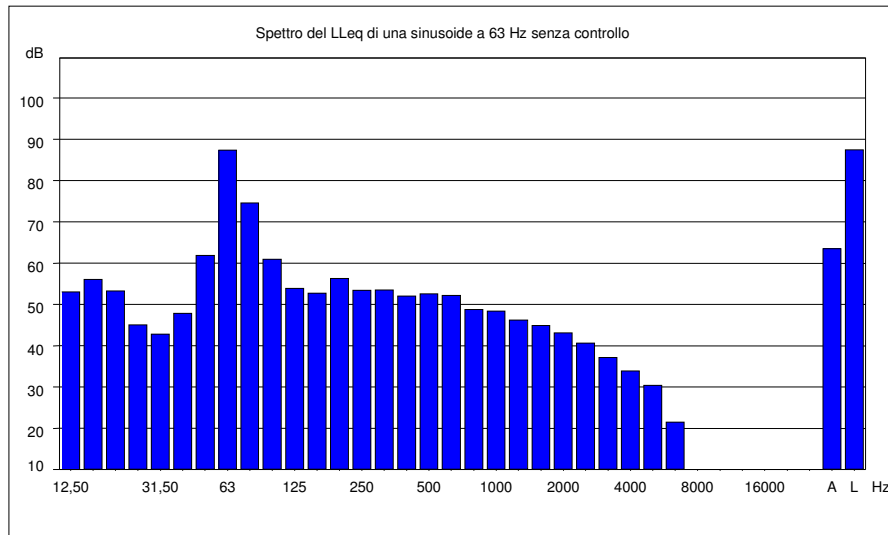


Fig. 30: spettro del Leq di una sinusoide a 63 Hz senza controllo.

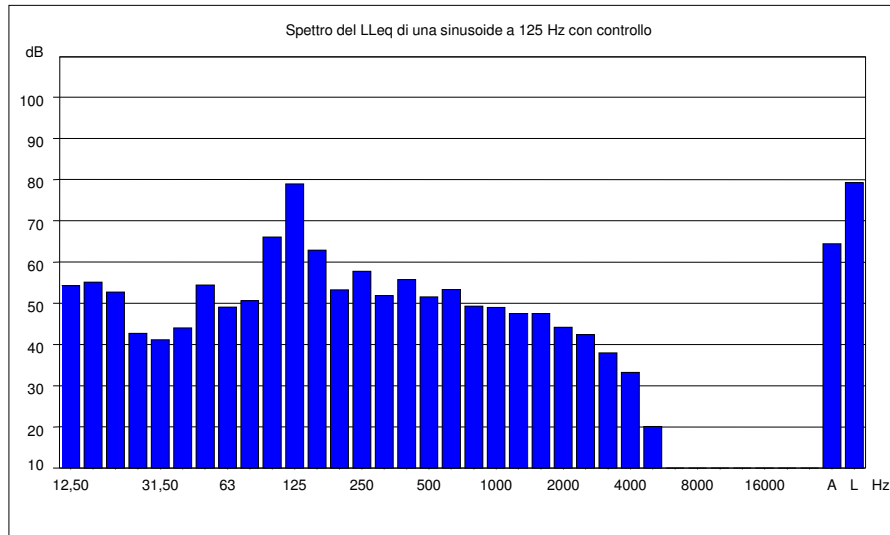


Fig. 31: spettro del Leq di una sinusoide a 125 Hz con controllo.

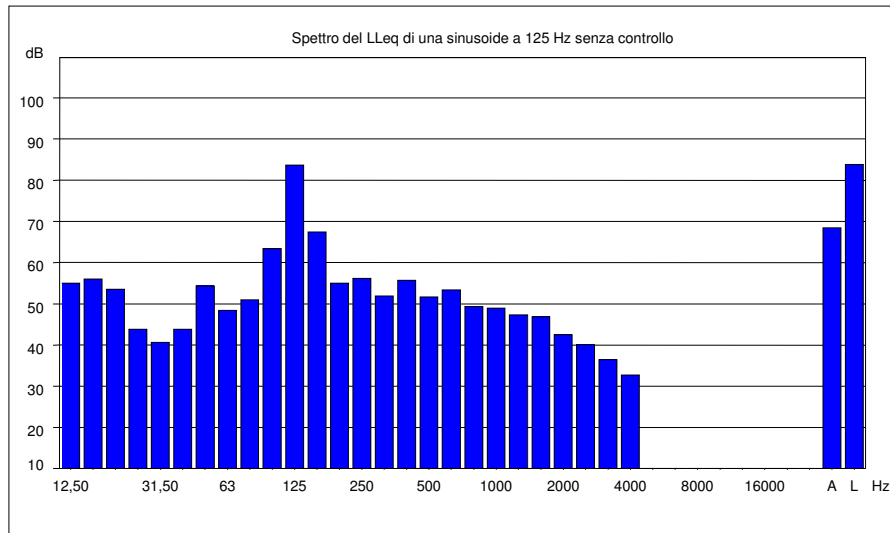


Fig. 32: spettro del Leq di una sinusoide a 125 Hz senza controllo.

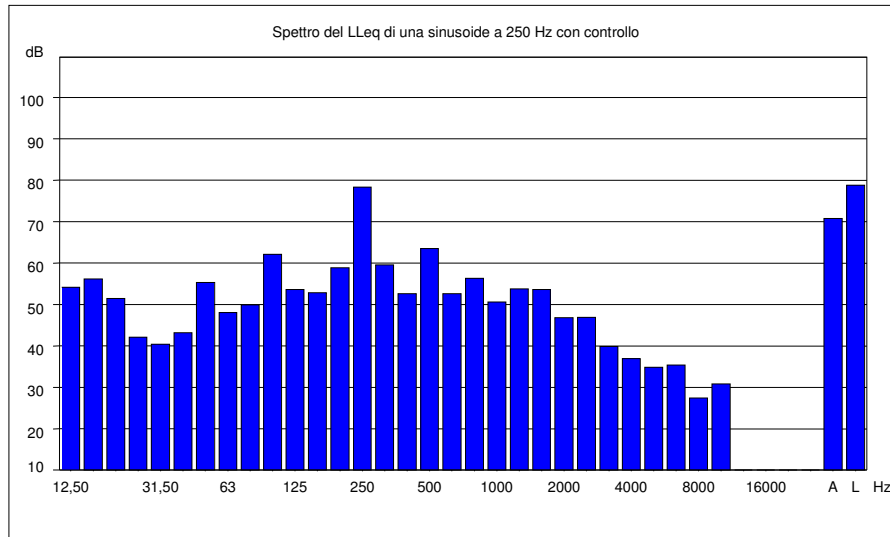


Fig. 33: spettro del Leq di una sinusoide a 250 Hz con controllo.

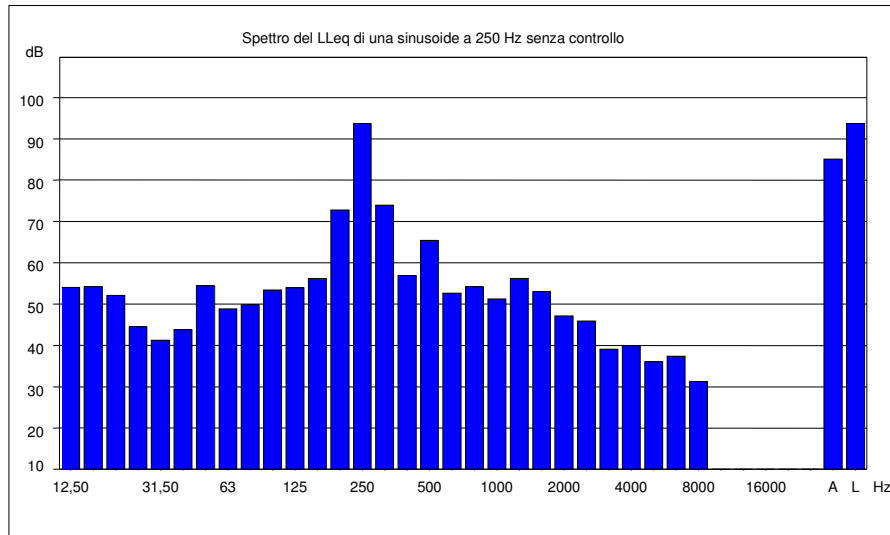


Fig. 34: spettro del Leq di una sinusoide a 250 Hz senza controllo.

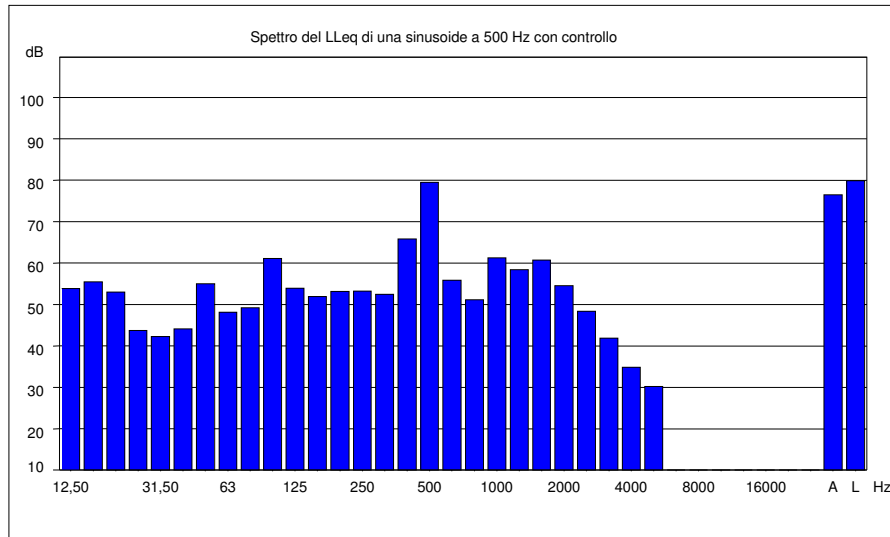


Fig. 35: spettro del Leq di una sinusoide a 500 Hz con controllo.

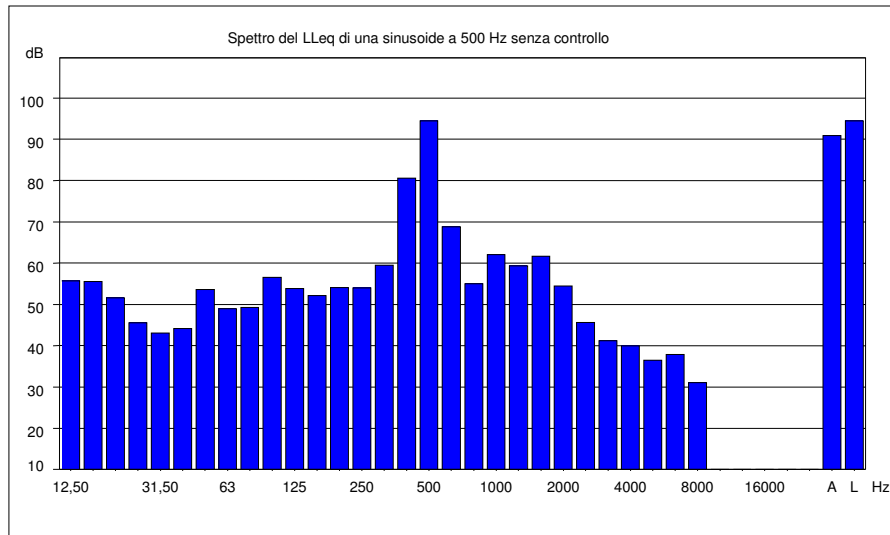


Fig. 36: spettro del Leq di una sinusoide a 500 Hz senza controllo.

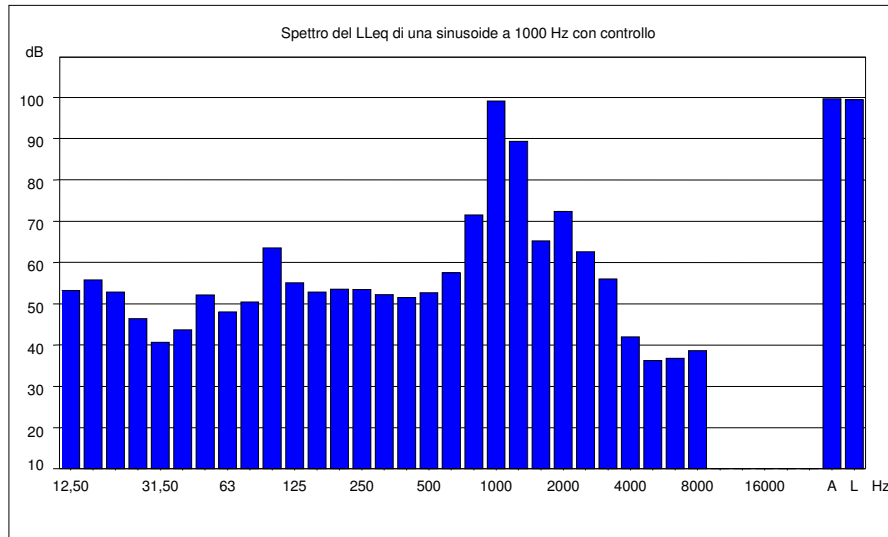


Fig. 37: spettro del Leq di una sinusoide a 1000 Hz con controllo.

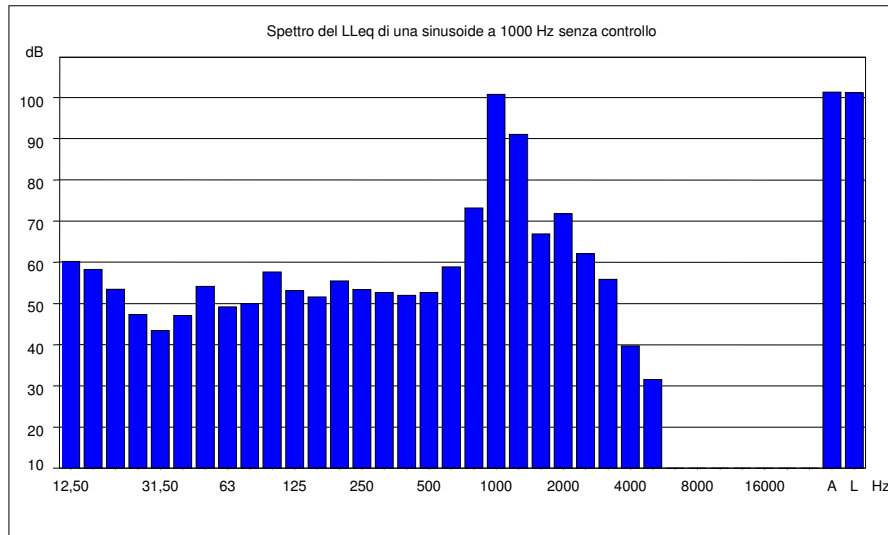


Fig. 38: spettro del Leq di una sinusoide a 1000 Hz senza controllo.

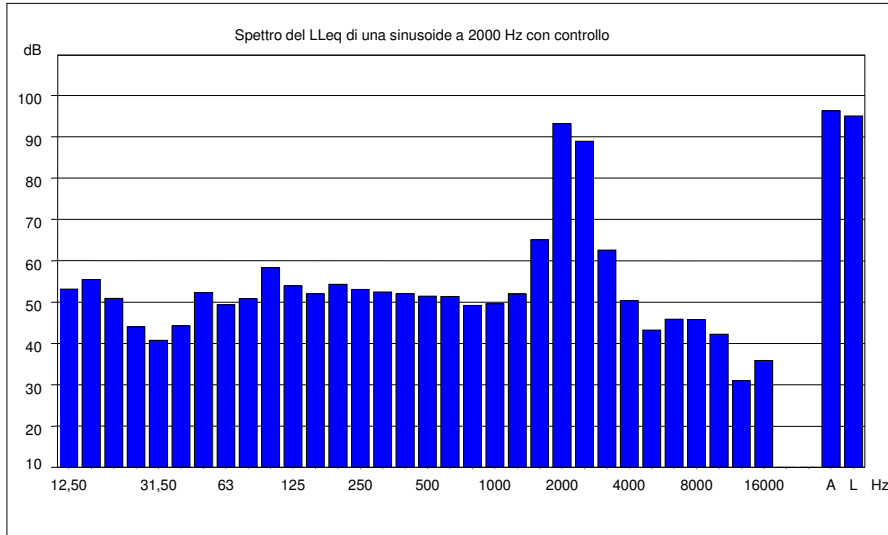


Fig. 39: spettro del Leq di una sinusoide a 2000 Hz con controllo.

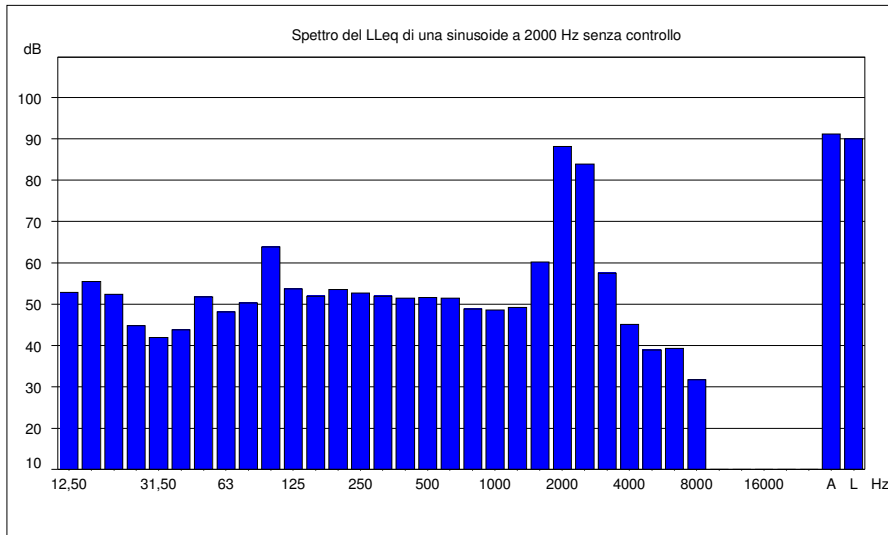


Fig. 40: spettro del Leq di una sinusoide a 2000 Hz senza controllo.

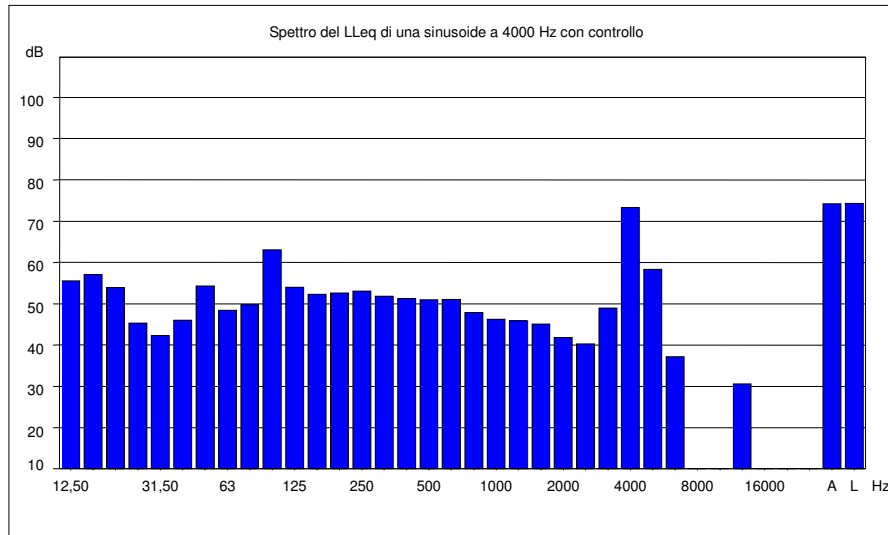


Fig. 41: spettro del Leq di una sinusoide a 4000 Hz con controllo.

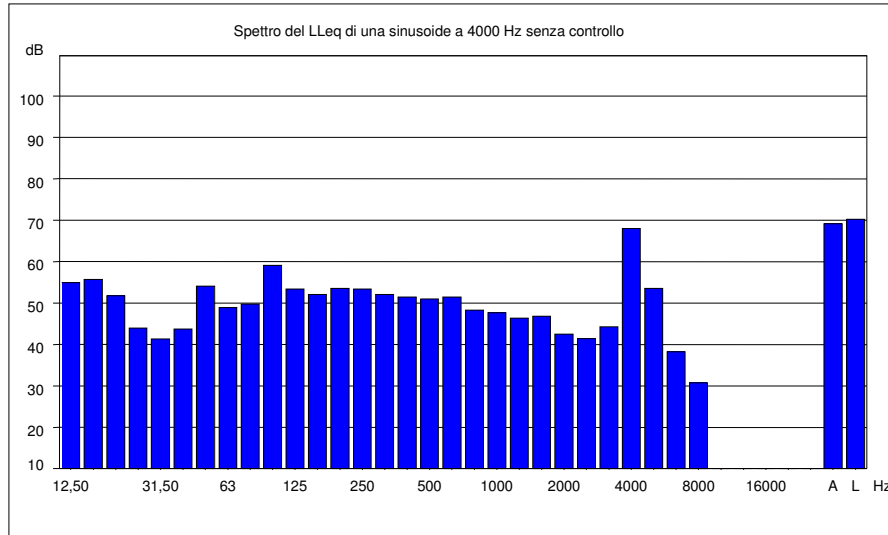


Fig. 42: spettro del Leq di una sinusoide a 4000 Hz senza controllo.

## 7.5 SECONDA SERIE DI MISURE

La seconda serie di misure è stata condotta assimilando il rumore prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale con un segnale acustico avente una forma quadra. Il segnale è stato generato mediante un generatore di funzioni ed è stato inviato sia all'amplificatore di rumore, sia al DSP. Così facendo, il DSP può disporre di un segnale di sincronismo la cui funzione è equivalente al segnale rilevato dal sensore del numero di giri del pneumatico nel funzionamento definitivo.

La frequenza è stata variata in modo da verificare la capacità del DSP di regolare automaticamente il segnale di antirumore al variare della frequenza del rumore

Lo schema a blocchi del sistema di controllo utilizzato nelle prove sperimentali è descritto in Fig. 28.

In tabella 4 sono riportate le prove sperimentali effettuate e, di seguito (figure 43, 44, ..., 54), i grafici dello spettro del rumore acquisito mediante fonometro.

Analizzando gli spettri in bande in terzi di ottava ottenuti generando un'onda quadra di frequenza fondamentale 125 Hz, si nota come l'uso dell'algoritmo adattivo riduca di circa 7 dBA il  $L_{eq}$  ponderato A rispetto al caso in cui il sistema di controllo è spento; una riduzione analoga si ha nel caso di un tono puro a 500 Hz.

In generale si constata il funzionamento del sistema di controllo atti-

vo anche per frequenze più basse (fino a 63 Hz) e più alte (fino a 1000 Hz) ma con riduzioni minori del livello sonoro. A frequenze superiori, come evidenziato dai risultati ottenuti a 2000 Hz, non è garantito il funzionamento del sistema di controllo. A 250 Hz il sistema non si comporta come previsto a causa della presenza di risonanze.

**Tabella 4:** *risultati della seconda serie di misure.*

frequenza armonica fondamentale onda quadra (Hz)	senza controllo		con controllo	
	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello equivalente lineare dB)	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello equivalente lineare dB)
63	76.8	82.8	75.3	79.6
125	87.0	92.4	80.1	84.2
250	81.8	83.7	83.1	82.6
500	85.7	87.7	79.7	79.9
1000	92.3	92.1	90.8	90.6
2000	82.6	81.6	89.0	87.8

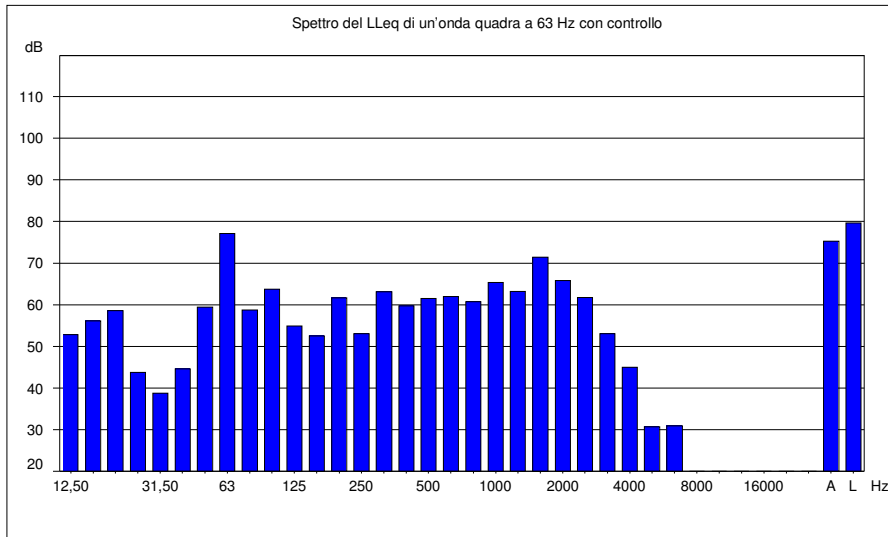


Fig. 43: spettro del Leq di un'onda quadra a 63 Hz con controllo.

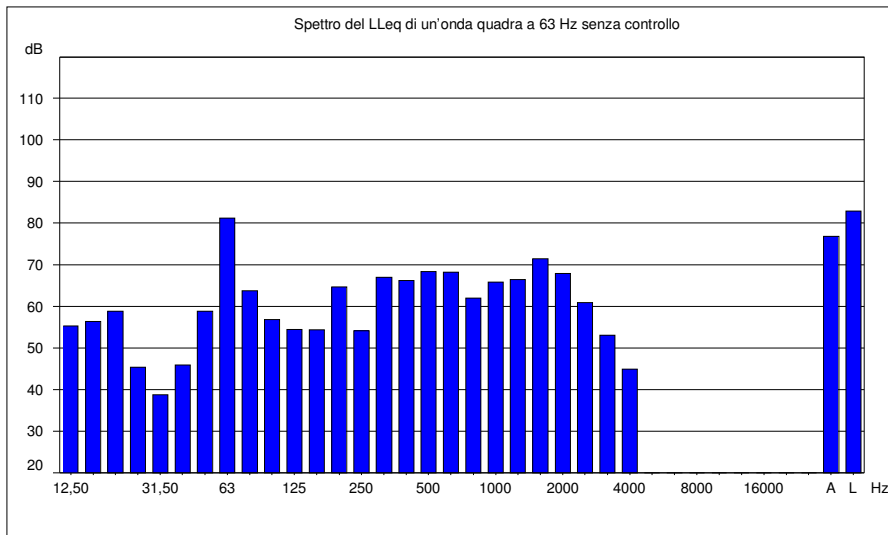


Fig. 44: spettro del Leq di un'onda quadra a 63 Hz senza controllo.

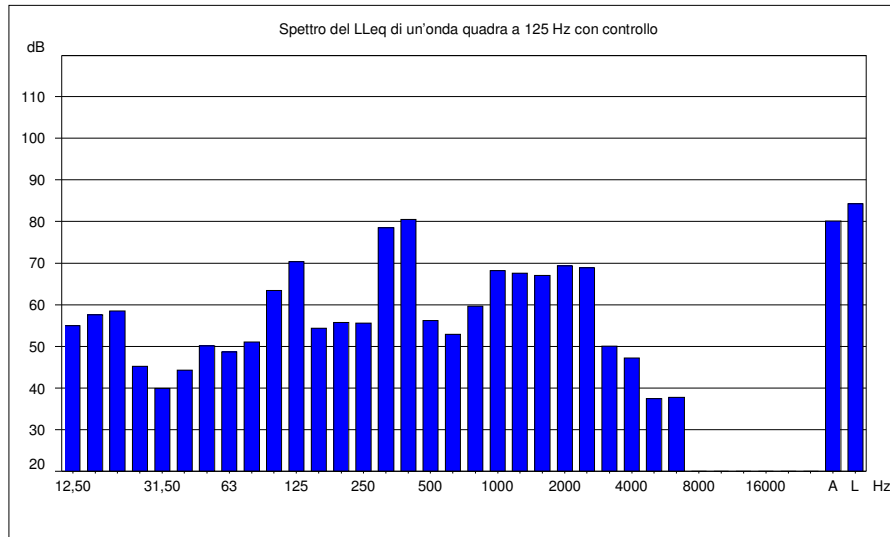


Fig. 45: spettro del Leq di un'onda quadra a 125 Hz con controllo.

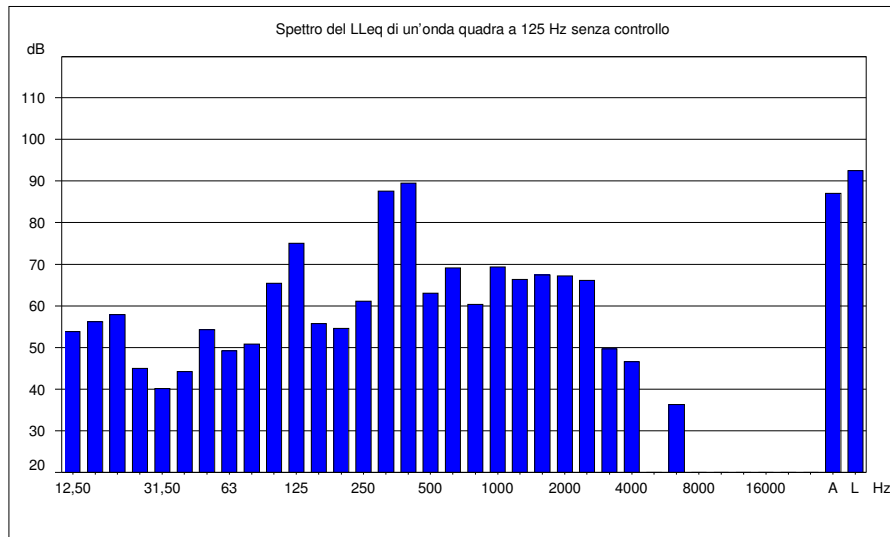


Fig. 46: spettro del Leq di un'onda quadra a 125 Hz senza controllo.

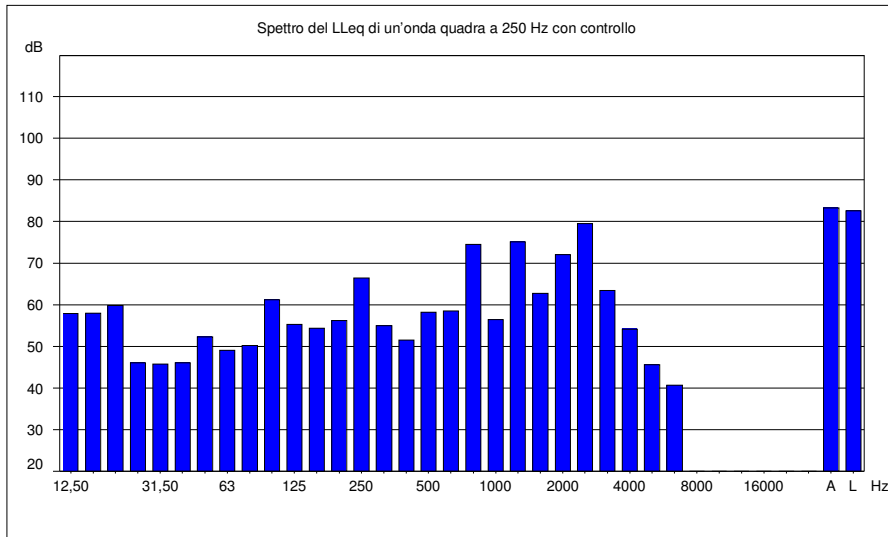


Fig. 47: spettro del Leq di un'onda quadra a 250 Hz con controllo.

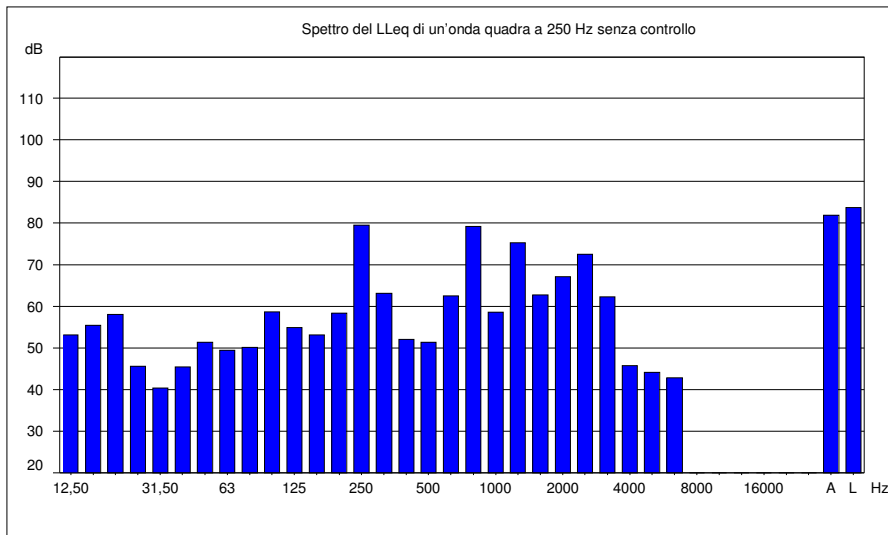


Fig. 48: spettro del Leq di un'onda quadra a 250 Hz senza controllo.

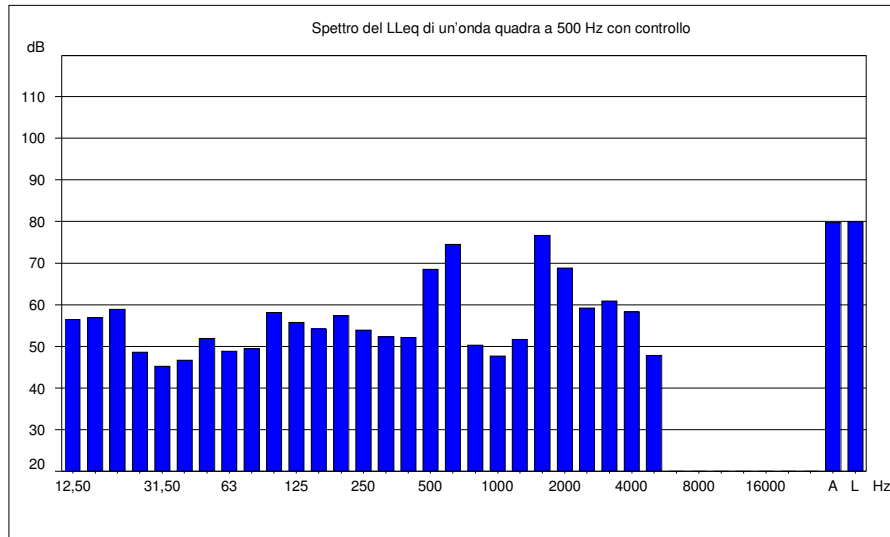


Fig. 49: spettro del Leq di un'onda quadra a 500 Hz con controllo.

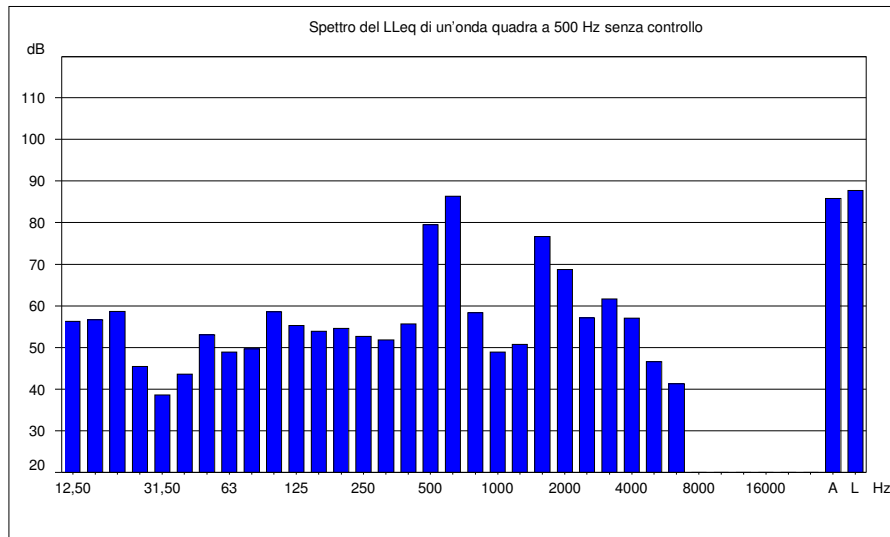


Fig. 50: spettro del Leq di un'onda quadra a 500 Hz senza controllo.

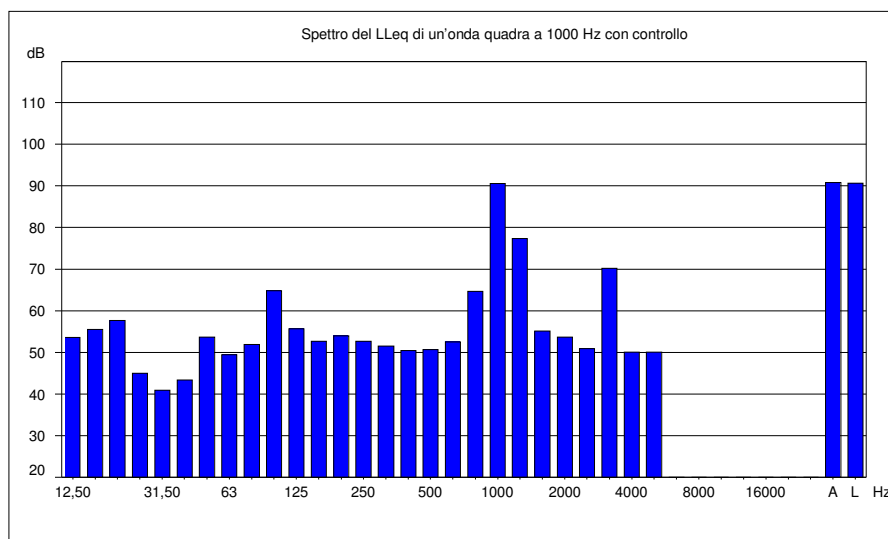


Fig. 51: spettro del Leq di un'onda quadra a 1000 Hz con controllo.

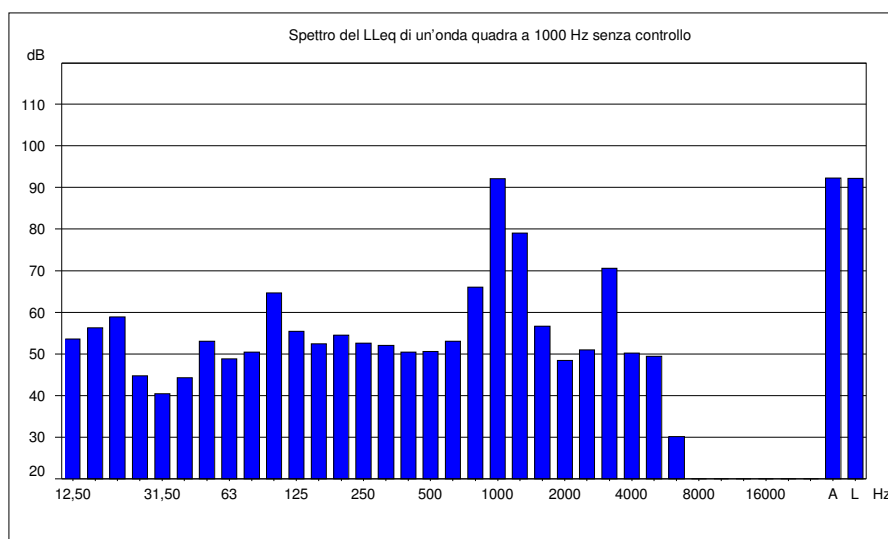
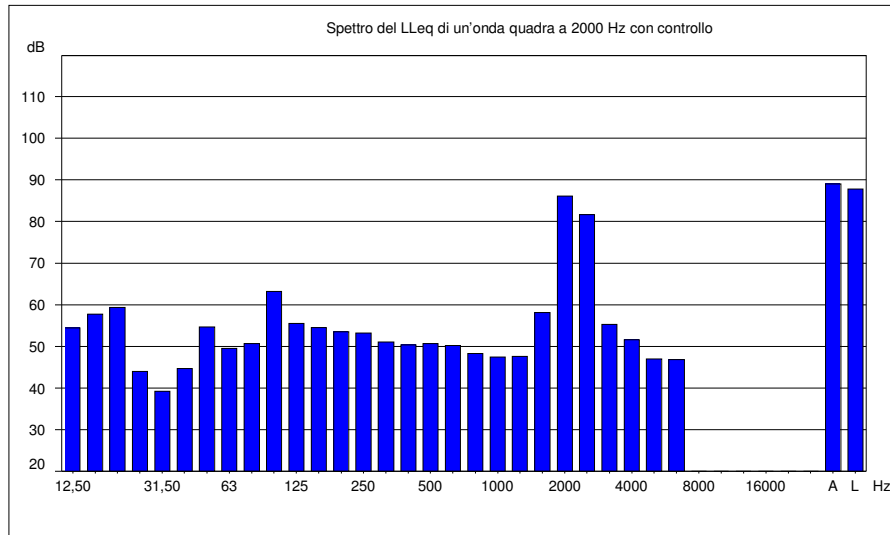
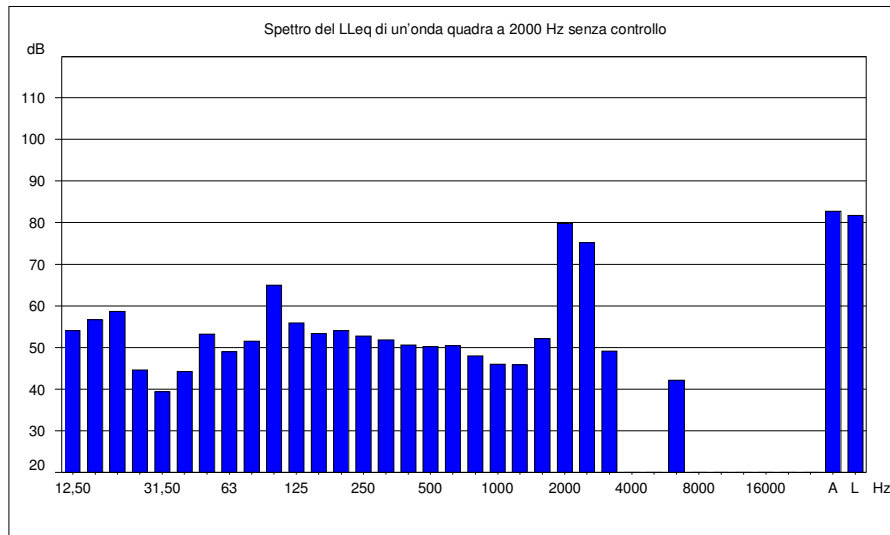


Fig. 52: spettro del Leq di un'onda quadra a 1000 Hz senza controllo.



**Fig. 53:** spettro del Leq di un'onda quadra a 2000 Hz con controllo.



**Fig. 54:** spettro del Leq di un'onda quadra a 2000 Hz senza controllo.

## 7.6 TERZA SERIE DI MISURE

La terza serie di misure è stata condotta utilizzando come segnale di rumore il segnale registrato prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale; lo stesso segnale è stato utilizzato come segnale di riferimento.

I parametri impiegati nell’algoritmo relativi alla prime due serie di misure sono risultati inadeguati a tale applicazione. Infatti, la terza serie di misure ha consentito di verificare che il sistema di controllo produce un’attenuazione del rumore solamente nella componente principale.

## 7.7 MODIFICHE APPORTATE AL PROGETTO ORIGINALE DEL PARAFANGO ELETTRONICO

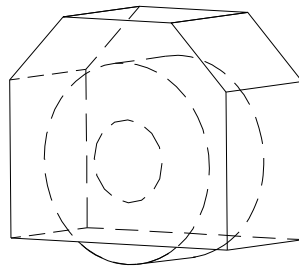
Per migliorare le prestazioni del sistema di controllo per il rumore da rotolamento sono state apportate delle modifiche al progetto meccanico del prototipo. Mediante tali variazioni si è cercato di creare un migliore accoppiamento fra il segnale, registrato, di rumore da rotolamento (emesso attraverso l’apertura posta sulla lastra piana ricoperta da un sottile strato di materiale simile ad asfalto) ed il segnale di antirumore (generato dall’altoparlante di controllo ed emesso attraverso la bocchetta d’uscita del parafango elettronico).

A questo scopo l’intera struttura del parafango elettronico è stata sostituita da un involucro in acciaio Inox che racchiude il pneumatico, come

effettivamente avviene sui veicoli nel caso reale.

La struttura è provvista di due altoparlanti, Fenner modello DW200P della potenza di 100 W ciascuno, che generano il segnale di controllo e lo immettono direttamente all'interno dell'involucro che racchiude il pneumatico: ciò consente un migliore accoppiamento dei segnali di rumore e di antirumore.

L'involucro è fissato al telaio già esistente e può essere regolato in diverse posizioni lungo l'asse verticale: in questo modo è possibile ottimizzare le prestazioni del sistema raggiungendo un compromesso tra una maggiore copertura del pneumatico (che garantisce un migliore accoppiamento tra i segnali di rumore ed antirumore) ed una minore copertura (per adattarsi al caso reale). L'involucro ha una forma parallelepipedica a sezione rettangolare variabile, come mostrato in Fig. 55.



**Fig. 55:** *involucro che ricopre il pneumatico.*

Le dimensioni dell'involucro descritto sono le seguenti:

- sezione rettangolare maggiore      30 x 60 cm;

- sezione rettangolare minore            30 x 30 cm;
- altezza complessiva                        51 cm.

Gli altoparlanti, posizionati davanti e dietro al pneumatico, sono racchiusi posteriormente da due casse acustiche riempite all'interno di materiale fonoassorbente in modo da eliminare gli effetti indesiderati dovuti alla radiazione sonora emessa dal lato posteriore del diaframma.

Le casse acustiche che contengono gli altoparlanti sono state realizzate in acciaio Inox ed hanno la forma di un tronco di piramide a base quadrata di dimensioni:

- base maggiore di lato                      22.5 cm;
- base minore di lato                        12.5 cm;
- altezza                                        11.5 cm.

Su ciascuna cassa acustica è stato praticato un foro del diametro di 2 cm, che mette in comunicazione il volume della cassa acustica direttamente con la cavità interna all'involucro. In questo modo viene aumentata l'efficienza dell'altoparlante stesso poiché si incrementa la cedevolezza del sistema elastico costituito dall'aria e dalla membrana del cono. Nella Fig. 56 è riportata la fotografia del parafango elettronico modificato.



**Fig. 56:** *fotografia del parafango elettronico.*



## **8. VERIFICHE SPERIMENTALI DEL FUNZIONAMENTO DEL PROTOTIPO**

### **8.1 VERIFICHE SPERIMENTALI**

Il parafrangente elettronico modificato ed il sistema di controllo sono stati collegati con il banco di prova allo scopo di calibrare, tarare l'intero sistema e verificarne le prestazioni.

A tale proposito è stata condotta una campagna di misure fonometriche nelle immediate vicinanze del punto di contatto ruota – pavimentazione stradale.

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 è stata effettuata sostituendo il rumore da rotolamento con un tono puro in modo da testare il sistema alle varie frequenze.

Una seconda serie di misure è stata, invece, condotta inviando al banco di prova il rumore da rotolamento registrato.

### **8.2 STRUMENTAZIONE FONOMETRICA**

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

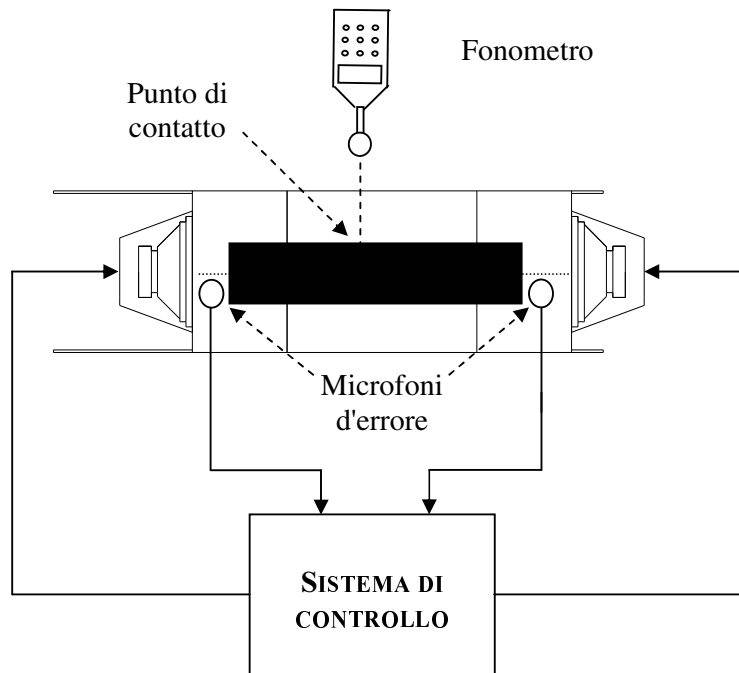
- conformità alle norme IEC651 (1979), IEC1260 (1995), ANSI S1.4 (1983) e ANSI S1.11 (1986);
- conformità agli standard ISO, DIN, BS, NBE, SS, Sia, ONORM, NF, UNI, ASTM e NEN;
- equipaggiato con microfono a condensatore prepolarizzato tipo 4189, sensibilità nominale  $-26 \text{ dB} \pm 1.5 \text{ dB}$  riferito a  $1 \text{ V/Pa}$ , capacità  $14 \text{ pF}$  (a  $250 \text{ Hz}$ );
- 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  $20^\circ\text{C}$ ) sono  $2 \text{ dB}$  a  $1 \text{ KHz}$ ,  $8 \text{ dB}$  a  $10 \text{ KHz}$  (bande in terzo d'ottava) e  $6 \text{ dB}$  a  $1 \text{ KHz}$ ,  $12 \text{ dB}$  a  $8 \text{ KHz}$  (bande d'ottava);
- dinamica di misura è pari a  $90 \text{ dB}$  (bande d'ottava ed in terzo d'ottava) e a  $80 \text{ dB}$  (ponderato A).

### 8.3 MODALITÀ DI MISURA

La campagna di misure fonometriche è stata condotta posizionando il microfono del fonometro a  $50 \text{ cm}$  dal punto di contatto ruota – pavimentazione stradale, come indicato in Fig. 57.

Sono state effettuate le misure per un periodo di  $10 \text{ s}$  all'interno del quale è stato valutato il livello equivalente continuo lineare e quello pon-

derato A su tutta la banda acustica del rumore prodotto in uscita al parafrangente elettronico; inoltre, è stato analizzato lo spettro del rumore valutando il Leq per ciascuna banda in terzi d'ottava.



**Fig. 57:** *disposizione della strumentazione per la campagna delle misure.*

#### 8.4 PRIMA SERIE DI MISURE

La prima serie di misure è stata condotta utilizzando un'onda sinusoidale inviata sia all'amplificatore di rumore, sia al DSP. Così facendo, il

DSP può disporre di un segnale di sincronismo la cui funzione è equivalente al segnale rilevato dal sensore del numero di giri del pneumatico nel funzionamento definitivo. Il segnale è stato generato mediante un generatore di funzioni.

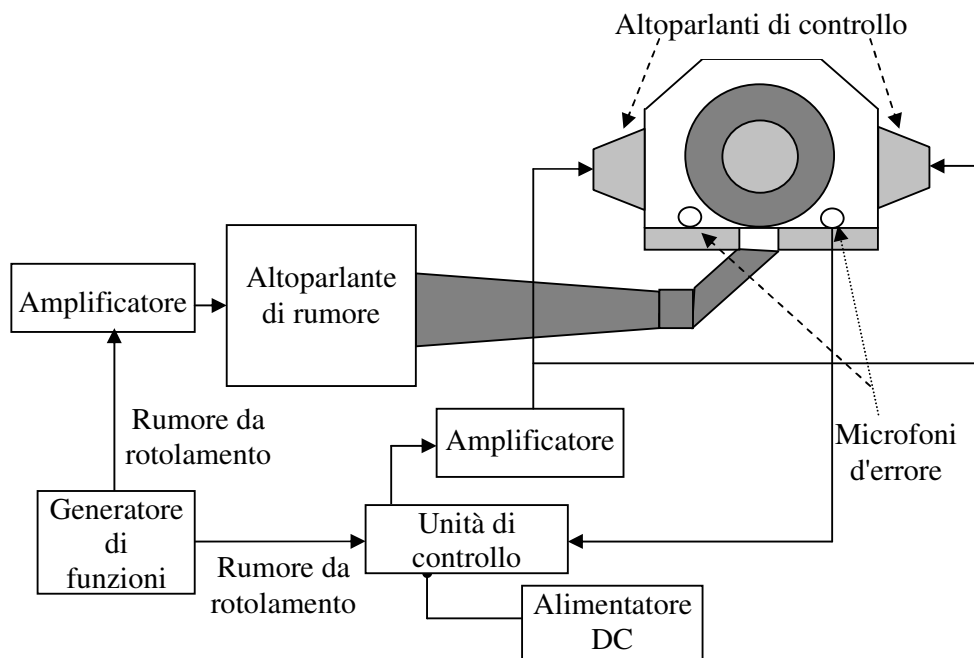
La frequenza è stata variata in modo da verificare la capacità del DSP di regolare automaticamente il segnale di antirumore al variare della frequenza del rumore

Lo schema a blocchi del sistema di controllo utilizzato nelle prove sperimentali è descritto in Fig. 58. In tabella 5 sono riportate le prove sperimentali effettuate e, di seguito (figure 59, 60, ..., 72), i grafici dello spettro del rumore acquisito mediante fonometro.

Analizzando gli spettri in bande in terzi di ottava ottenuti generando un tono sinusoidale di frequenza fondamentale 250 Hz, si nota come l'uso dell'algoritmo adattivo riduca di circa 15 dBA il  $L_{eq}$  ponderato A rispetto al caso in cui il sistema di controllo è spento; una riduzione analoga si ha nel caso di un tono puro a 500 Hz.

Rispetto al primo prototipo di parafrangente elettronico, si constata un forte miglioramento del sistema di controllo attivo anche a 125 Hz e a 1000 Hz (riduzioni comprese tra i 10 e i 15 dBA). In generale si constata un miglioramento del funzionamento del sistema di controllo attivo anche per frequenze più basse (fino a 63 Hz). A frequenze superiori, come evidenziato dai risultati ottenuti a 2000 e 4000 Hz, non è garantito il funzionamento del sistema di controllo.

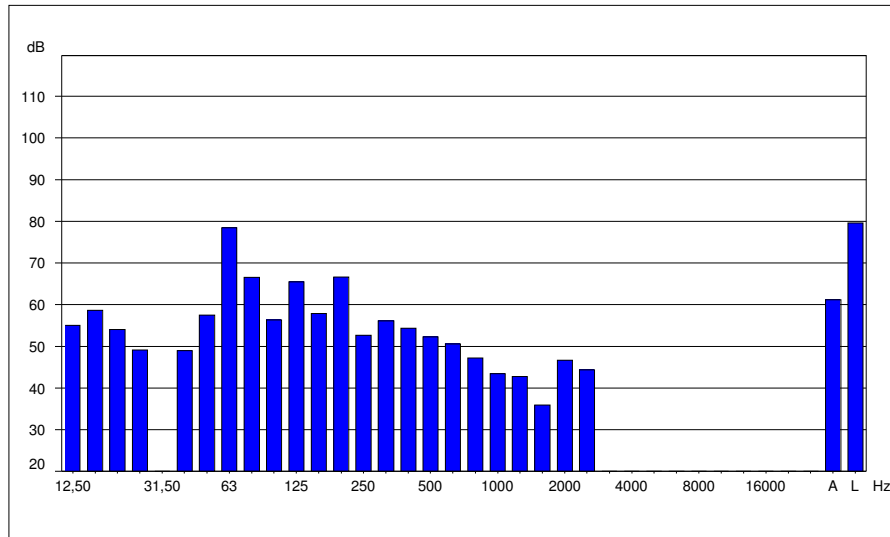
Il parametro di adattamento è stato scelto cercando di raggiungere un compromesso tra velocità di convergenza e stabilità.



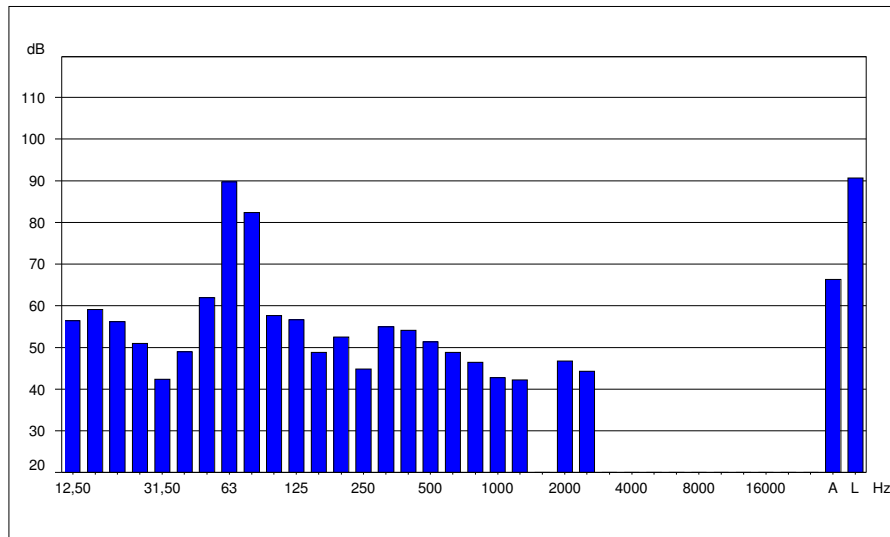
**Fig. 58:** *schema a blocchi del sistema di controllo utilizzato nella prima serie di misure.*

**Tabella 5:** *risultati della prima serie di misure.*

frequenza onda sinusoidale (Hz)	senza controllo		con controllo	
	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello equivalente lineare dB)	LAeq (livello equivalente ponderato A dBA)	LLeq (livello e- quivalente lineare dB)
63	66.2	90.6	61.2	79.5
125	70.7	86.2	57.1	68.2
250	84.8	93.2	70.8	78.9
500	90.1	93.6	75.7	79.4
1000	100.6	100.6	79.0	79.0
2000	89.7	88.5	94.1	93.0
4000	68.2	69.5	75.1	75.4



**Fig. 59:** *spettro del Leq di una sinusoide a 63 Hz con controllo.*



**Fig. 60:** *spettro del Leq di una sinusoide a 63 Hz senza controllo.*

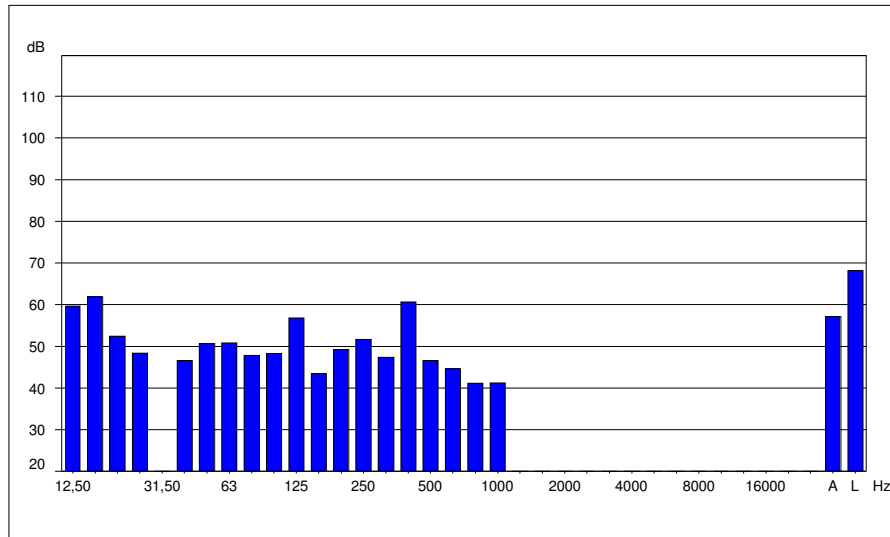


Fig. 61: spettro del Leq di una sinusoide a 125 Hz con controllo.

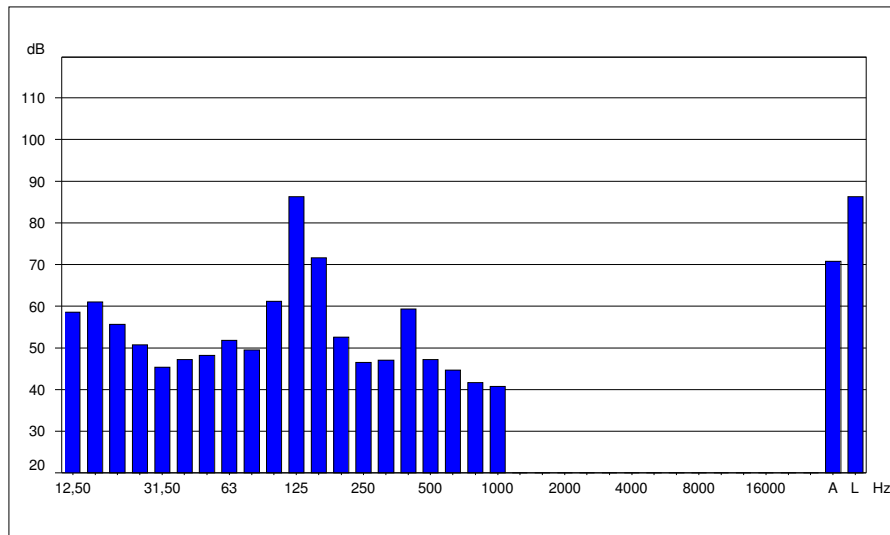


Fig. 62: spettro del Leq di una sinusoide a 125 Hz senza controllo.

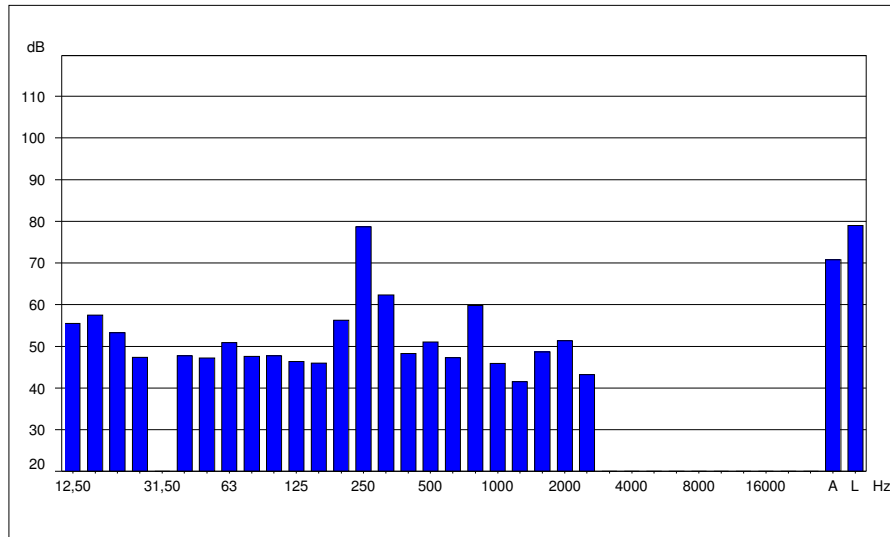


Fig. 63: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 250 Hz con controllo.

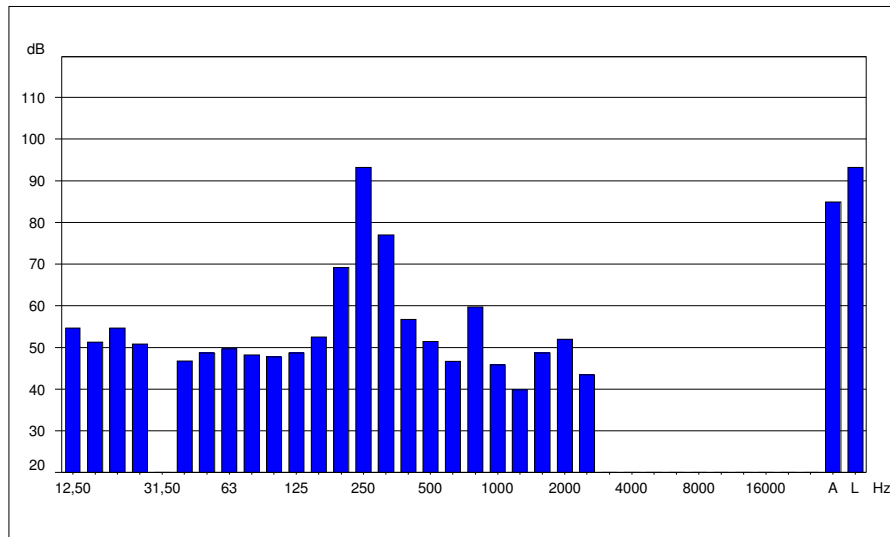


Fig. 64: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 250 Hz senza controllo.

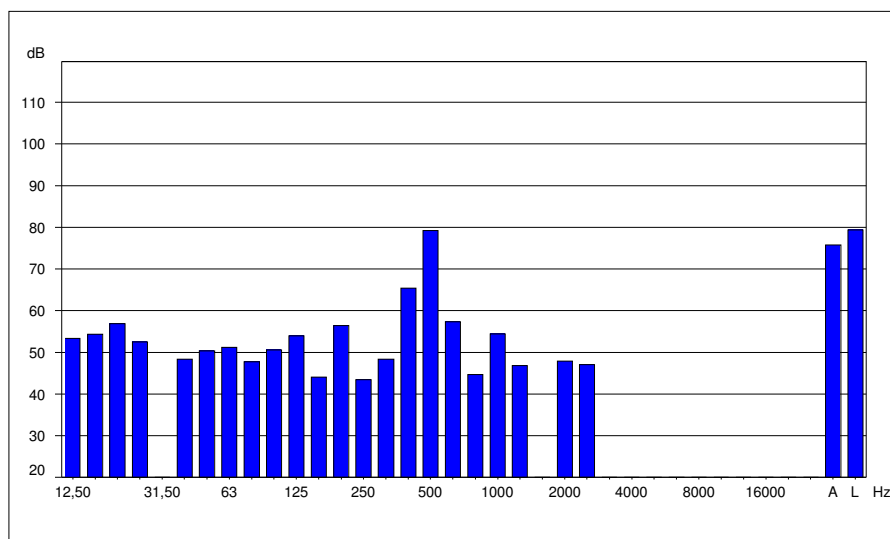


Fig. 65: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 500 Hz con controllo.

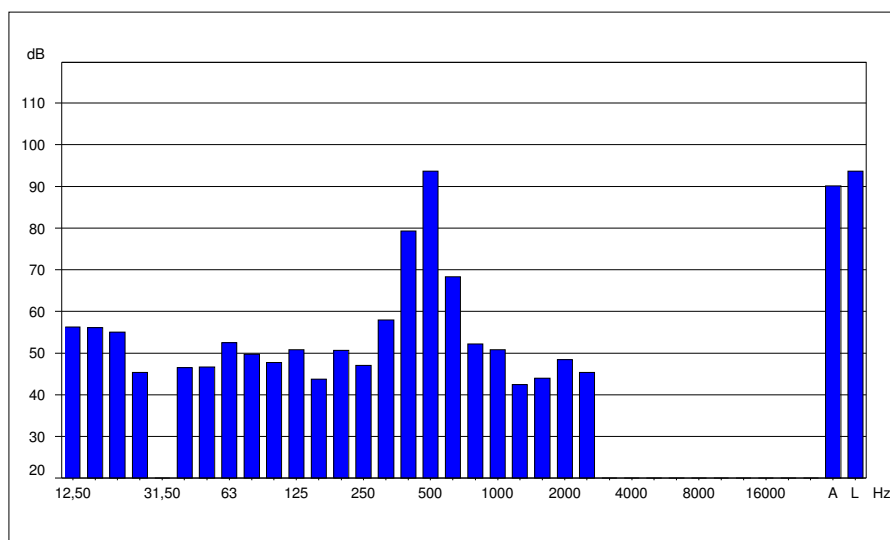


Fig. 66: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 500 Hz senza controllo.

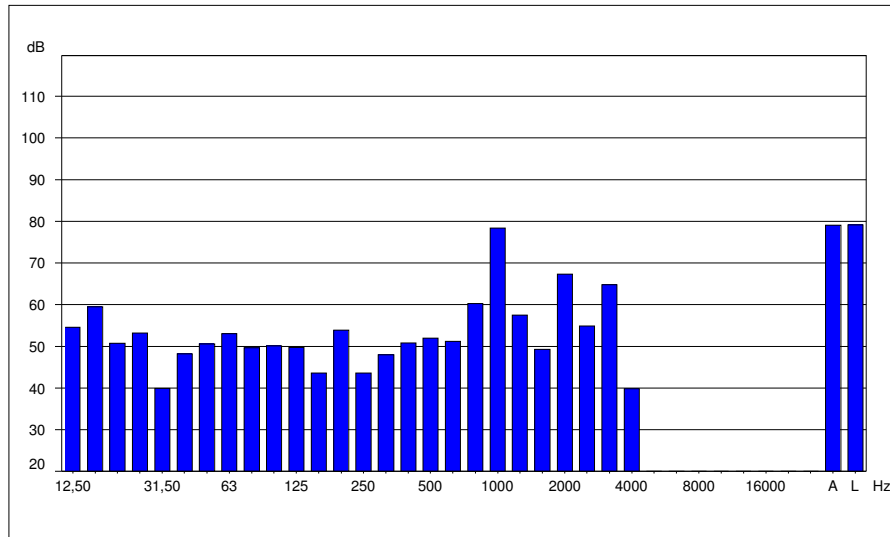


Fig. 67: spettro del Leq di una sinusoide a 1000 Hz con controllo.

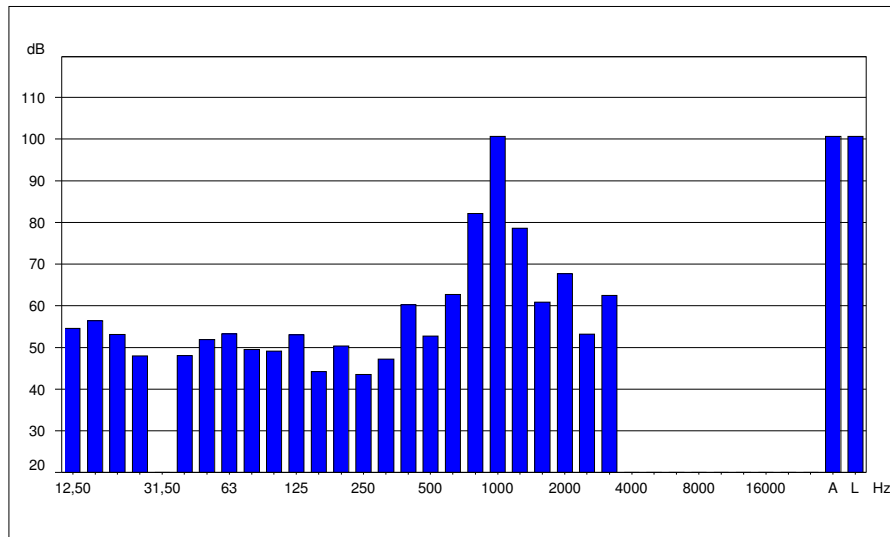


Fig. 68: spettro del Leq di una sinusoide a 1000 Hz senza controllo.

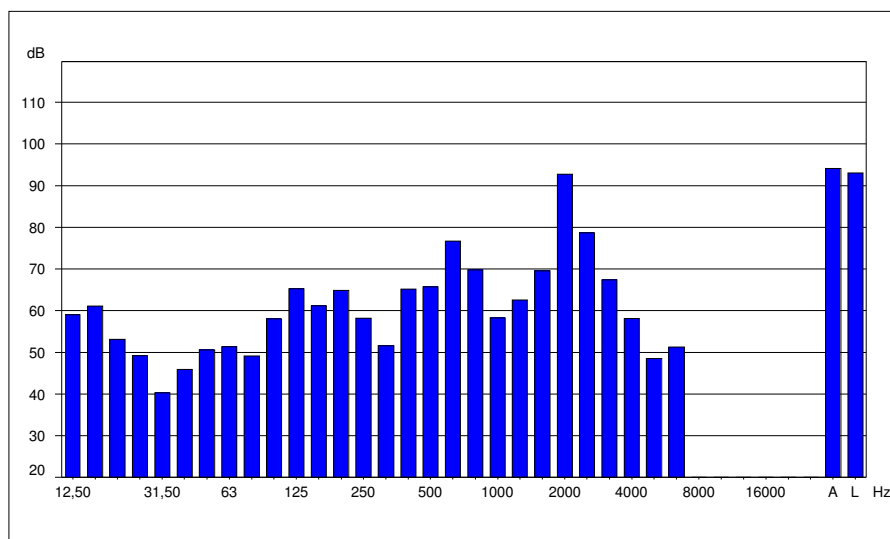


Fig. 69: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 2000 Hz con controllo.

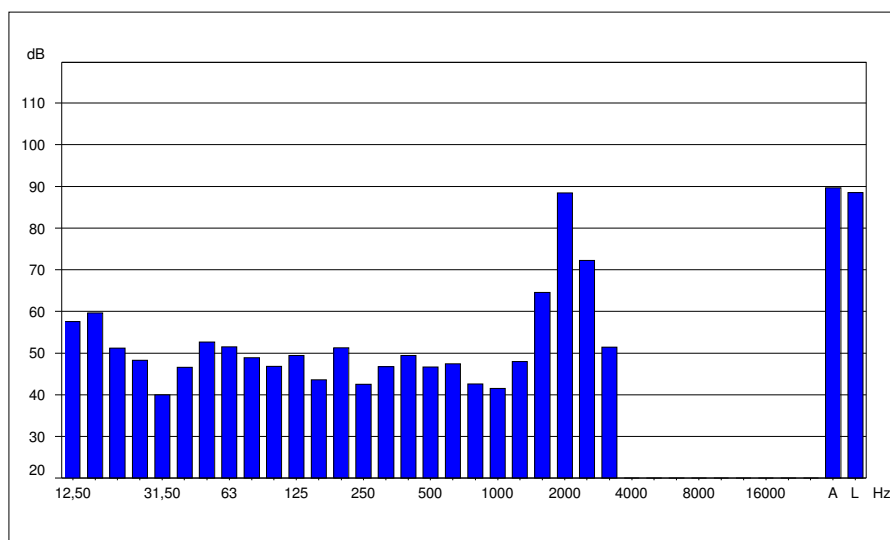


Fig. 70: spettro del  $Leq$  di una sinusoide a 2000 Hz senza controllo.

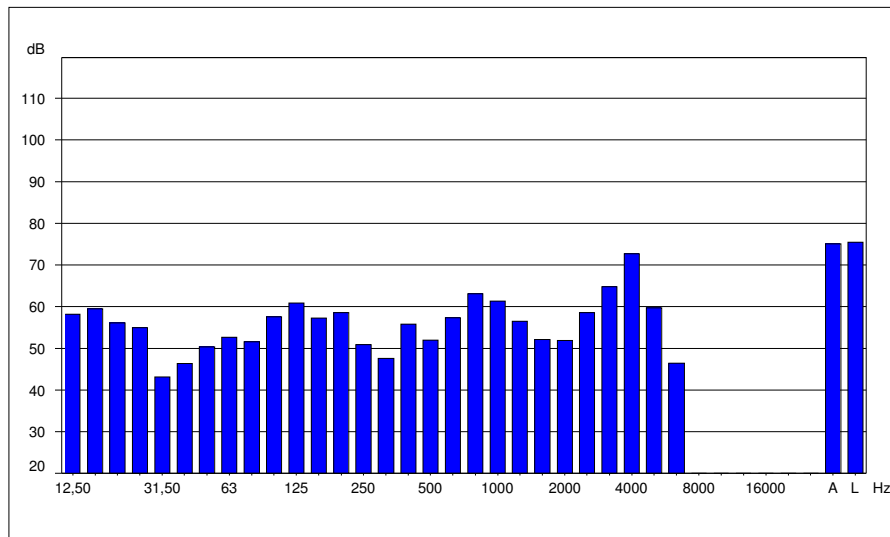


Fig. 71: spettro del Leq di una sinusoide a 4000 Hz con controllo.

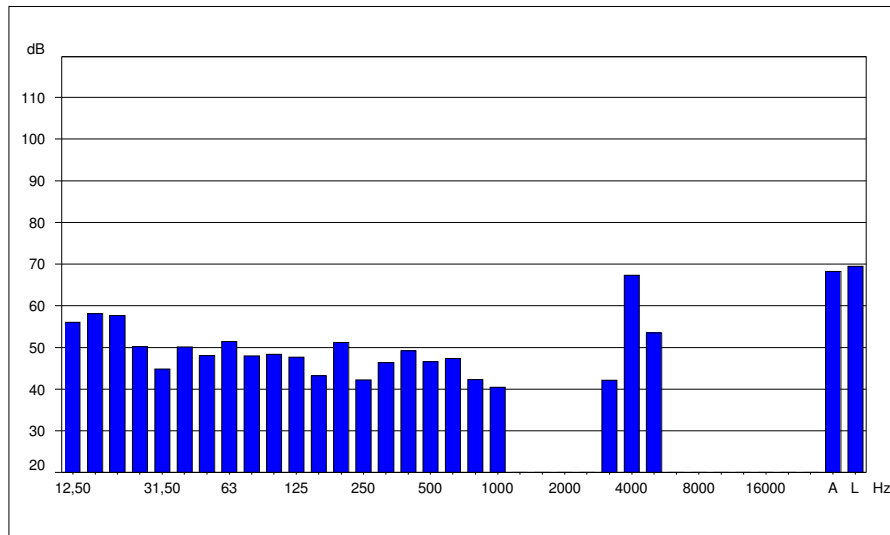


Fig. 72: spettro del Leq di una sinusoide a 4000 Hz senza controllo.

## 8.5 SECONDA SERIE DI MISURE

La seconda serie di misure è stata condotta utilizzando come segnale di rumore il segnale registrato prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale; lo stesso segnale è stato utilizzato come segnale di riferimento.

La seconda serie di misure ha consentito di verificare che il sistema di controllo produce un'attenuazione del rumore nella componente principale di circa 15 dBA: tale riduzione è maggiore di quella ottenuta con il primo prototipo di parafango elettronico.

## **9. CONCLUSIONI**

Dall'analisi delle esperienze tecnico-scientifiche internazionali si è potuto constatare l'innovatività e l'attualità dei propositi della ricerca; sia perché applicazioni funzionanti di controllo attivo del rumore da rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale non sono ancora state realizzate, sia perché le recenti normative internazionali prescrivono limiti alle emissioni acustiche di mezzi di trasporto sempre più stringenti.

Dall'analisi delle misure effettuate per rilevare il rumore da rotolamento in diverse condizioni di velocità e per differenti condizioni pneumatico – strada, è stata individuata la dipendenza dello spettro e del livello di rumore da rotolamento dalla velocità del mezzo e dal tipo di pneumatico.

Lo sviluppo di un modello matematico del sistema ha consentito di individuare circuiti equivalenti elettrici con i quali è possibile calcolare la risposta acustica del parafango elettronico al variare dei parametri geometrici e in diverse condizioni di funzionamento.

Nell'ambito della ricerca in oggetto 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 sincronismo, fornito dal sensore del numero di giri del pneumatico per unità di tempo, e di un segnale di errore opportunamente prelevato da un microfono.

Sono state svolte le fasi riguardanti il progetto meccanico e la realizzazione di un prototipo statico di parafango elettronico.

In fase di installazione e collaudo del prototipo, l'unità di controllo e il parafango elettronico sono stati collegati e testati mediante l'impiego di un banco di prova. Non avendo ottenuto i risultati attesi, sono state apportate delle modifiche progettuali e si è provveduto alla realizzazione di un nuovo prototipo statico di parafango elettronico.

La verifica sperimentale delle prestazioni acustiche di quest'ultimo prototipo ha mostrato che il parafango elettronico consente una riduzione, nella componente principale, di almeno 15 dBA del livello di potenza acustica emessa dal meccanismo di rotolamento prodotto dal contatto ruota – pavimentazione stradale.

## 10. LISTA DEI SIMBOLI

<i>Simbolo</i>	<i>Descrizione</i>
$B$	induzione magnetica dovuta alla bobina mobile dell'altoparlante
$B_m$	induzione magnetica dovuta alla bobina mobile dell'altoparlante del parafango elettronico
$C_l$	capacità associata alla cavità iniziale del parafango elettronico
$C_{as}$	capacità associata alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$C_c$	capacità del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$C_{cm}$	capacità del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante
$C_{f1}, C_{f2}$	capacità associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$D_{ef}$	diametro della sezione che collega la cavità iniziale con il condotto terminale del parafango elettronico
$D_{fm}$	diametro del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$E_g$	generatore di tensione associato alle onde acustiche emesse dall'altoparlante del parafango elettronico
$E_r$	generatore di tensione associato alle onde acustiche emesse dall'altoparlante
$L_1$	induttanza associata alla cavità iniziale del parafango elettronico
$L_2$	induttanza associata alle onde sonore che fuoriescono dalla cavità iniziale verso il condotto terminale del parafango elettronico
$L_3$	induttanza associata al condotto terminale del para-

	fango elettronico
$L_{as}$	induttanza associata alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$L_c$	impedenza, puramente induttiva, associata alla tromba conica
$L_c$	induttanza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$L_{cm}$	induttanza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante
$L_{f1}, L_{f2}$	induttanza associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$L_m$	induttanza associata al cono ed al condotto terminale di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale
$L_R$	induttanza associata al tubo di raccordo tra il condotto conico ed il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale
$M$	pendenza del tratto a sezione non costante del tubo di raccordo tra il condotto conico ed il punto di contatto ruota – pavimentazione
$P_{cas}$	pressione dell'aria interna alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$P_{ci}$	pressione dell'aria interna alla cavità iniziale del parafango elettronico
$P_{fm}$	pressione dell'aria interna al foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$R_l$	resistenza associata alle onde sonore che fuoriescono dalla cavità iniziale verso il condotto terminale del parafango elettronico
$R_{aria}$	resistenza dell'aria

$R_{as}$	resistenza associata alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$R_c$	resistenza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$R_{cm}$	resistenza del circuito equivalente parallelo RLC associato alla cassa acustica dell'altoparlante
$R_e$	resistenza elettrica della bobina mobile dell'altoparlante del parafango elettronico
$R_{f1}, R_{f2}$	resistenza associata al singolo foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$R_g$	resistenza interna dell'altoparlante del parafango elettronico
$S$	area della sezione del tubo di raccordo tra il condotto conico ed il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale
$S(x)$	area della sezione del tubo di raccordo tra il condotto conico ed il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale in funzione della coordinata $x$
$S_0$	area della sezione della tromba conica in corrispondenza dell'ascissa $x_0$
$S_{cas}$	superficie della sezione media della cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$S_{ci}$	area della sezione della cavità iniziale del parafango elettronico
$S_{cf}$	area della sezione che collega la cavità iniziale con il condotto terminale del parafango elettronico
$S_{ct}$	area della sezione del condotto terminale del parafango elettronico
$S_D$	superficie del diaframma dell'altoparlante
$S_{Dm}$	superficie del diaframma dell'altoparlante del parafango elettronico

$S_{fm}$	area della sezione del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$S_l$	area della sezione della tromba conica in corrispondenza dell'ascissa $x_1$
$V_{cas}$	volume della cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$V_{ci}$	volume della cavità iniziale del parafango elettronico
$V_{fm}$	volume del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$W_c$	energia cinetica totale che caratterizza la tromba conica
$dm$	elemento di massa
$dW_c$	energia cinetica nel tratto $dx$
$h_{cf}$	spessore della sezione che collega la cavità iniziale con il condotto terminale del parafango elettronico
$h_{fm}$	spessore del foro che collega la parte interna della cassa acustica dell'altoparlante con la cavità interna del parafango elettronico
$l$	lunghezza equivalente del tubo di raccordo tra il condotto conico ed il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale
$l_0$	lunghezza della tromba conica in corrispondenza dell'ascissa $x_0$
$l_b$	lunghezza del filo conduttore della bobina mobile dell'altoparlante
$l_{cas}$	altezza della cassa acustica dell'altoparlante del parafango elettronico
$l_{ci}$	lunghezza della cavità iniziale del parafango elettronico

---

$l_{ct}$	lunghezza del condotto terminale del parafrangente elettronico
$l_1$	lunghezza della tromba conica in corrispondenza dell'ascissa $x_1$
$l_1-l_0$	lunghezza del tronco di cono che produce l'adattamento di impedenza
$l_m$	lunghezza del cono e del condotto terminale di raccordo con il punto di contatto ruota – pavimentazione stradale
$q$	portata acustica
$v(x)$	velocità delle particelle sulla sezione corrispondente all'ascissa $x$
$\gamma$	rapporto tra il calore specifico a pressione costante e quello a volume costante dell'aria
$\mu$	viscosità dinamica dell'aria
$\rho$	densità dell'aria



## **11. BIBLIOGRAFIA**

- [1] D.M. Howard and J.A.S. Angus, *Acoustic and Psychoacoustics*, Focal Press, 2000.
- [2] R. Spagnolo, *Manuale di Acustica*, UTET Libreria, Torino, 2001.
- [3] L.L. Beranek, *Noise and Vibration Control*, edito da L.L. Beranek, 1988.
- [4] UNI EN ISO 9614-1/97, *Acustica. Determinazione dei livelli di potenza sonora delle sorgenti di rumore mediante il metodo intensimetrico. Misurazione per punti discreti*.
- [5] ASM International, *Engineering Plastics*, 2000.