

# **SISTEMA ATTIVO PER LA RIDUZIONE DEL RUMORE EMESSO DAI MOTORI DIESEL UTILIZZATI NELLE LOCOMOTIVE DI MANOVRA**

*Paolo Betti<sup>(1)</sup>, Luca Gori<sup>(1)</sup>, Paolo Masini<sup>(1)</sup>, Giovanni Pugi<sup>(1)</sup>, Federico Rossi<sup>(2)</sup>, Andrea Nicolini<sup>(2)</sup>*

<sup>(1)</sup> *Trenitalia s.p.a. – UTMR*

<sup>(2)</sup> *CIRIAF, Università degli Studi di Perugia*

## **Sommario**

Nella presente memoria viene descritto un sistema per la riduzione del rumore emesso dai motori diesel utilizzati nelle macchine di manovra ferroviarie. Un prototipo (marmitta elettronica), basato sulla tecnica del controllo attivo del rumore, è stato realizzato nell'ambito di una Convenzione tra Trenitalia s.p.a. e CIRIAF. Il sistema, basato su tecniche di controllo attivo del rumore, permette di ottenere, in combinazione con l'impiego di marmitte tradizionali, un'attenuazione della componente principale del rumore superiore a 12 dB.

## **1. Introduzione**

I motori a combustione interna installati sulle macchine di manovra ferroviarie sono responsabili di elevate emissioni acustiche; il rumore viene immesso nell'ambiente per mezzo del condotto di scarico dei gas combusti. La distribuzione in frequenza del rumore è proporzionale al numero di giri del motore; inoltre circa l'80% della potenza è distribuita nell'intervallo di frequenze 30-500 Hz. I tradizionali sistemi di attenuazione del rumore sono costituiti da marmitte installate lungo il condotto di scarico dei gas; la loro efficacia è particolarmente modesta alle basse frequenze (30-500 Hz). Nella presente nota viene descritto un sistema per la riduzione del rumore emesso dai motori diesel utilizzati nelle macchine di manovra ferroviarie basato sulla tecnica del controllo attivo del rumore [1]: un segnale acustico di egual ampiezza ma di fase opposta a quello prodotto dal motore viene generato da due altoparlanti all'interno di una particolare cavità coassiale al condotto di espulsione dei gas. Nella sezione di scarico avviene l'interferenza distruttiva fra il rumore prodotto dal motore e quello generato da un altoparlante; il risultato è una notevole diminuzione del rumore immesso nell'ambiente [2]. Un dispositivo elettronico, di concezione originale, consente la generazione del segnale di alimentazione da parte di un altoparlante a partire da segnali di riferimento prelevati mediante opportuni sensori.

Una campagna di misure ha consentito di verificare che l'impiego contemporaneo del sistema proposto e delle tradizionali marmitte determina una notevole attenuazione della componente principale del rumore, superiore in media a 12 dB. Il prototipo è stato realizzato nell'ambito di una Convenzione tra Trenitalia s.p.a. (ex ITF - Italiana Trasporti Ferroviari) e CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) dal titolo "Realizzazione di dispositivi basati sul controllo attivo del rumore per la riduzione delle emissioni acustiche di macchine di manovra ferroviarie". Il prototipo suddetto è stato installato su una macchina di manovra ferroviaria modello D.245.

## **2. Caratteristiche della macchina di manovra D.245**

La macchina di manovra ferroviaria D.245 ha le seguenti caratteristiche:

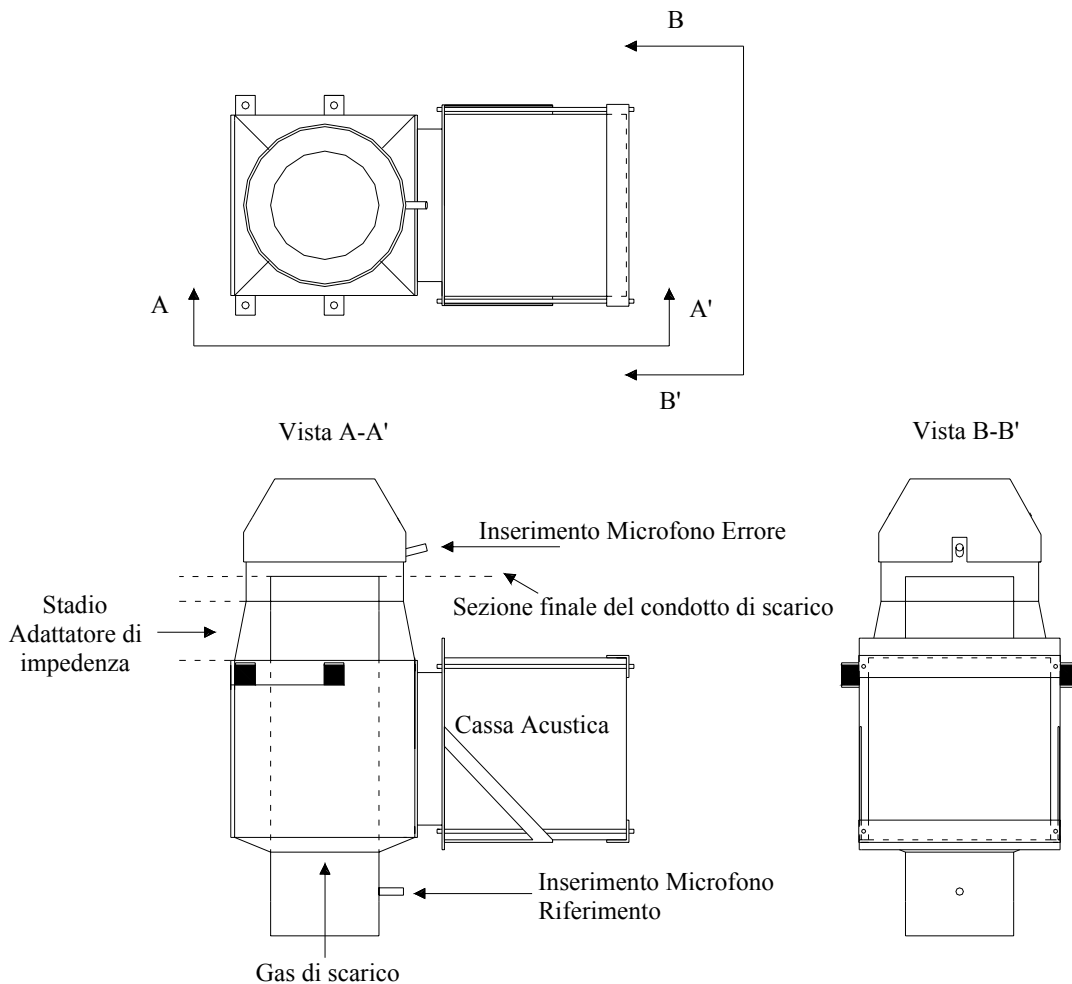
- potenza 500 KW;
- lunghezza totale 9240 mm;

- diametro ruote motrici 1040 mm;
- massa in servizio 48 t;
- velocità massima: 65 Km/h;
- motore diesel.

Il regime di rotazione del motore può variare da 600 rpm a 1200 rpm circa. I gas di scarico del motore defluiscono attraverso un condotto a sezione circolare. In presenza della sola marmitta tradizionale lo spettro del livello di rumore emesso, valutato mediante una campagna di misure intensimetriche, mostra una potenza acustica pari a 102 dB (a 600 giri/min) e 120 dB (a 1200 giri/min) [3]. La frequenza relativa alla componente principale del rumore è pari a 31.5 Hz a 600 rpm e 63 Hz a 1200 rpm.

### 3. Descrizione del prototipo "marmitta elettronica"

Il prototipo è costituito da un corpo in lamiera, cui è connessa una cassa acustica per la generazione del segnale di antirumore, come indicato in Fig.1.



*Figura 1 Progetto della marmitta elettronica.*

Le caratteristiche della cassa acustiche sono le seguenti [4]:

- sistema di controllo della distorsione a basse frequenze mediante accelerometro;

- altoparlante (diametro pari a 32cm) caratterizzato da elevata efficienza fino a frequenze pari a 20Hz;
- amplificatore da 1250W rms.

In Fig.2 è riportata una fotografia della marmitta elettronica installata nella motrice ferroviaria. La forma della marmitta è tale che la parte terminale del condotto di scarico è completamente contenuta nel suo interno [5]; la sezione di uscita dei gas è coassiale alla sezione finale della cavità (vedi Fig. 1). Il segnale di antirumore prodotto dall'altoparlante si propaga attraverso la corona circolare limitata internamente dal condotto di scarico dei gas ed esternamente dalla sezione finale della marmitta. Il segnale di rumore e quello di cancellazione interferiscono distruttivamente in corrispondenza della sezione finale della marmitta [6]. L'altoparlante è alimentato da un segnale elettrico generato da una unità di controllo per l'elaborazione numerica del segnale (DSP).



*Figura 2 Foto della marmitta elettronica.*

In Fig.3a si riporta lo schema a blocchi dell'unità di controllo ed in Fig.3b lo schema a blocchi dell'algoritmo di controllo. L'unità di controllo, che genera il segnale di antirumore, è costituita da una scheda di Digital Signal Processing SHARC ADSP 21160 della Analog Devices. L'unità di controllo viene implementata con algoritmi adattativi, che consentono di minimizzare il segnale acustico all'uscita del condotto di scarico costituito dalla somma del rumore e dell'antirumore. Con riferimento allo schema di fig.3b, il segnale d'errore  $e(n)$  rappresenta la somma tra il rumore del motore all'uscita della marmitta e il segnale emesso dall'altoparlante;  $x(n)$  è il rumore prodotto direttamente dal motore prima di percorrere la parte terminale del condotto di scarico e miscelarsi con il segnale di antirumore;  $c(n)$  è il segnale di riferimento proporzionale al numero di giri del motore;  $y'(n)$  è il segnale di

antirumore. L'aggiornamento dei coefficienti del filtro adattativo  $W(z)$  avviene utilizzando un algoritmo di tipo FxLMS [7]. La funzione di trasferimento  $H(z)$  che identifica il percorso tra la generazione del segnale di rumore da parte dell'unità di controllo e la sezione della marmitta in cui avviene il controllo, è calcolata dal DSP. Il segnale di riferimento  $c(n)$  è filtrato dalla funzione calcolata  $S(z)$  in modo da tener conto del percorso compiuto dal segnale di antirumore prima di interferire con quello di rumore. I segnali di riferimento e di errore sono prelevati mediante microfoni inseriti in specifici supporti a monte ed a valle della marmitta elettronica (vedi Fig. 1).

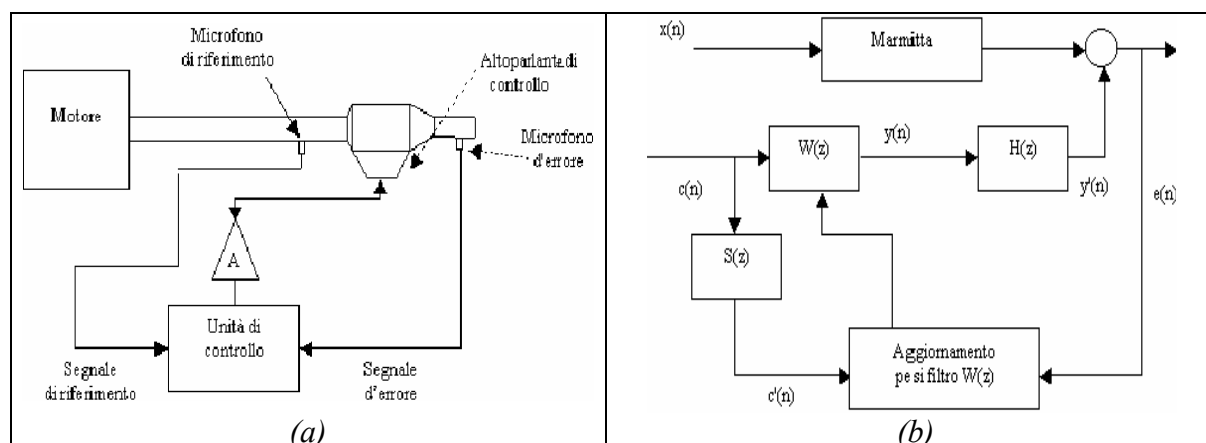


Figura 3: a) schema a blocchi del sistema di controllo. b) schema a blocchi dell'algoritmo di controllo.

#### 4. Problematiche termiche e di vibrazioni

Le seguenti problematiche tecniche sono emerse durante i test:

- A) l'altoparlante ed i microfoni sono soggetti alle alte temperature dei gas e dei detriti di scarico;
- B) I microfoni prelevano segnali corrotti da componenti ad alta frequenza dovute alle vibrazioni meccaniche, specialmente ad elevate regimi di rotazione del motore.

Una campagna di misure di temperature è stata condotta al fine di risolvere la problematica A): in corrispondenza del regime massimo di rotazione (1200 rpm), la temperatura sulla superficie esterna di microfoni e altoparlante è di 80°C. Tale circostanza può provocare danneggiamenti al diaframma dell'altoparlante ed alle membrane dei microfoni.

Il diaframma dell'altoparlante è stato protetto mediante una membrana in gomma siliconica dello spessore di 0.5 mm (vedi Fig. 4). I microfoni sono stati separati dal contatto diretto con i gas di scarico mediante materiale isolante termico (conducibilità termica 0.035 W/mK, temperatura operativa massima 150°C), che non introduce alcuna distorsione acustica. I microfoni e l'isolante termico sono stati inseriti in condotti in ottone di lunghezza 9 cm (vedi Fig. 5a).

I condotti in ottone sono stati collegati al corpo principale della marmitta elettronica mediante giunzioni flessibili realizzate in EPDM allo scopo di risolvere la problematica B) (vedi Fig. 5b). In questo modo, i microfoni sono stati isolati dalle vibrazioni prodotte dalle pareti della marmitta durante il movimento della macchina di manovra.

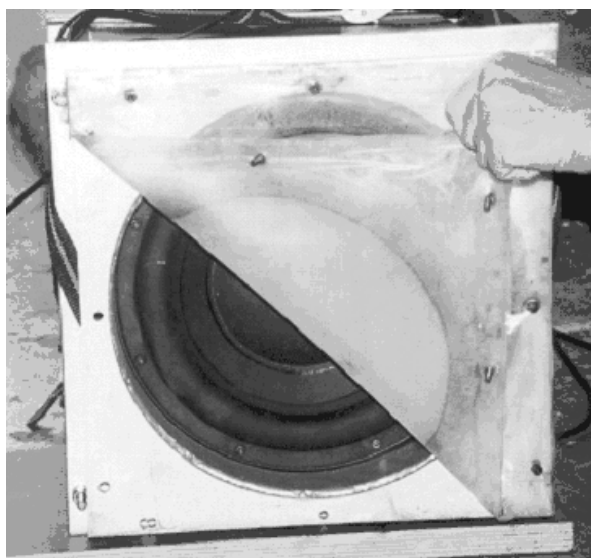


Fig. 4: altoparlante di controllo protetto dalla membrana in gomma siliconica

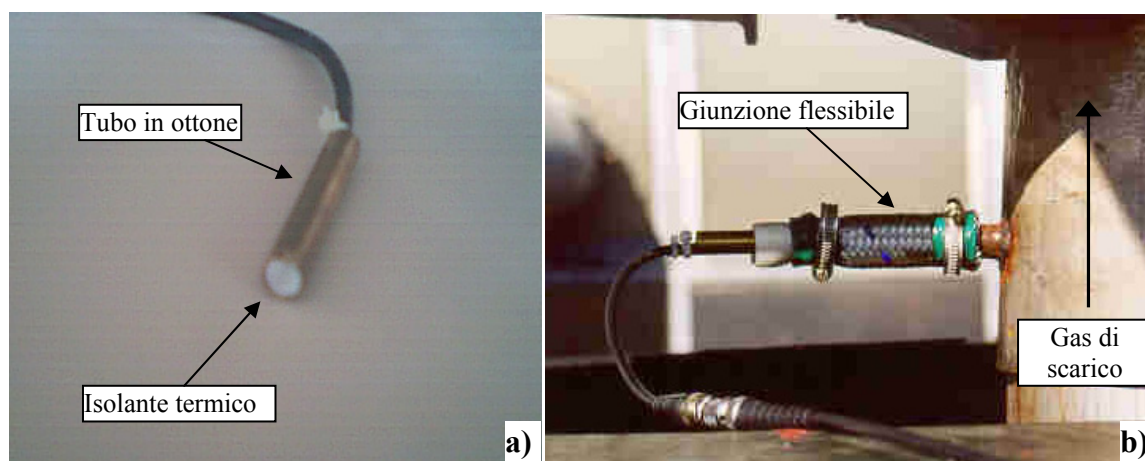


Fig. 5: a) protezione termica dei microfoni; b) microfono di riferimento protetto

## 5. Verifiche sperimentali

Il prototipo è stato installato in serie al condotto di scarico originale della macchina di manovra ferroviaria D.245, come mostrato in Fig.2. Una indagine sperimentale ha consentito di valutare l'attenuazione introdotta dal sistema di controllo attivo.

In Fig. 6 si riportano i punti di misura. In Fig. 7 e 8, si riportano gli spettri del livello equivalente di rumore misurato nel punto H (vedi Fig. 5) nelle seguenti condizioni:

- sistema di controllo attivo spento (OFF) a 600 giri/min;
- sistema di controllo attivo acceso (ON) a 600 giri/min;
- sistema di controllo attivo spento (OFF) a 1200 giri/min;
- sistema di controllo attivo acceso (ON) a 1200 giri/min.

I livelli equivalenti sono stati ottenuti impostando il tempo di integrazione pari ad 1 minuto e sono rappresentativi dell'intero spettro del rumore.

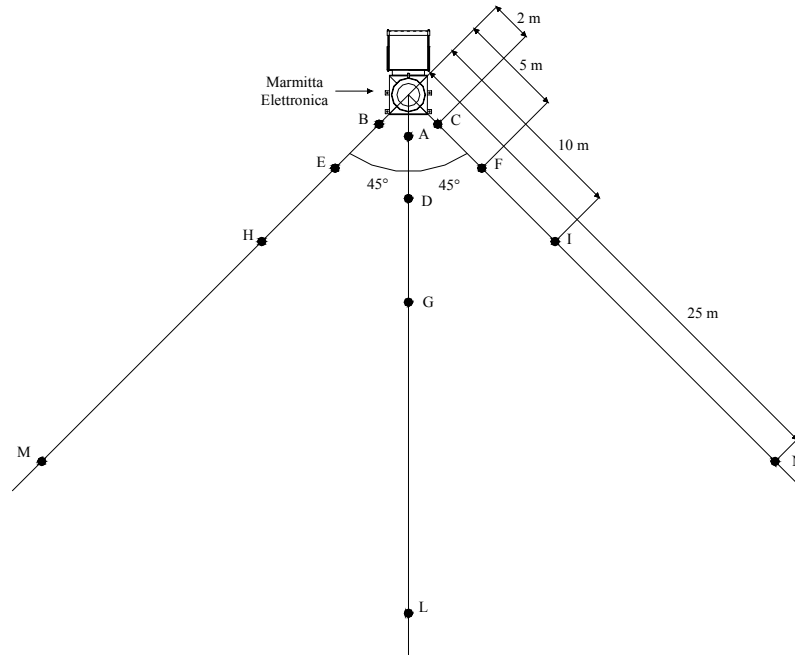


Fig.6: Disposizione dei punti di misura.

Il valore medio dell'attenuazione valutata nei 15 punti di misura di Fig. 4 a due regimi di rotazione è 3 dBA; tale risultato è da ritenersi significativo poiché le frequenze principali del rumore sono inferiori ai 200 Hz.

L'attenuazione introdotta dal sistema di controllo sulle componenti principali è infatti superiore ai 12 dB in tutti i punti di misura. A basse frequenze il coefficiente di attenuazione dell'aria mostra valori piccoli rispetto a quelli relativi a frequenze più elevate [8]; i risultati ottenuti mostrano infatti che, aumentando la distanza del punto di misura dall'uscita della marmitta elettronica, i valori dell'attenuazione sull'intero spettro del rumore aumentano.

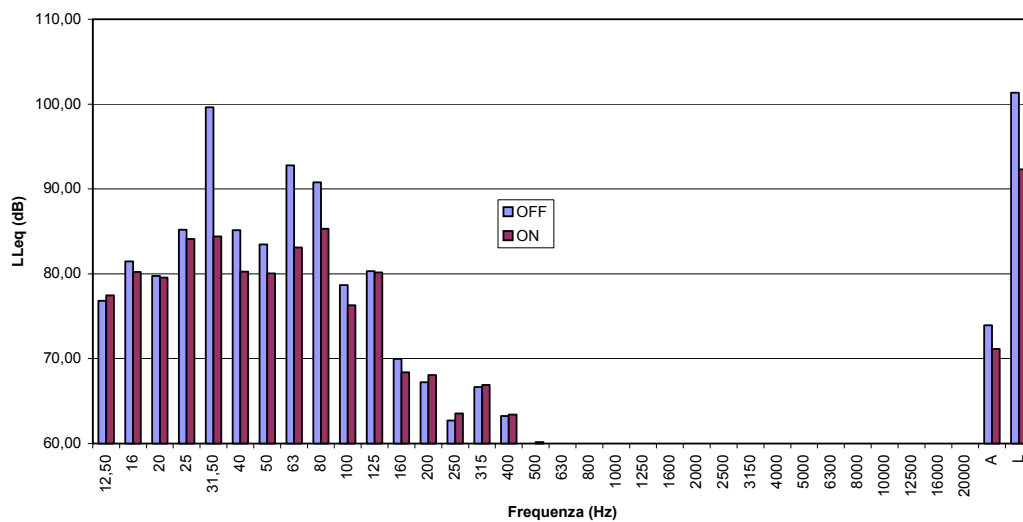


Fig.7: Confronto tra lo spettro del rumore con sistema di controllo acceso e spento (regime di rotazione 600 giri/min – punto di misura H).

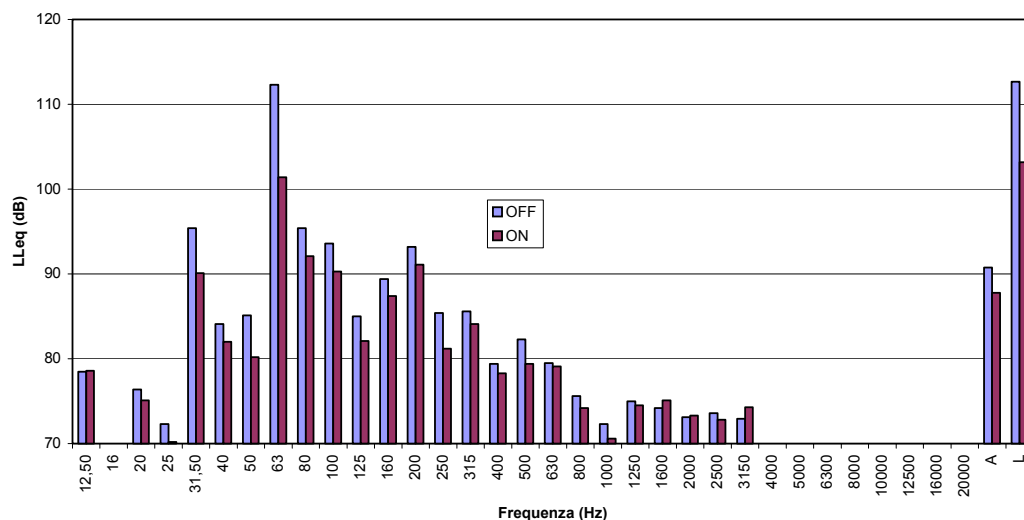


Fig.8: Confronto tra lo spettro del rumore con sistema di controllo acceso e spento (regime di rotazione 1200 giri/min – punto di misura H).

## 6. Conclusioni

Nell'ambito di una Convenzione tra Trenitalia s.p.a. e CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici) è stato realizzato un prototipo di marmitta elettronica per l'attenuazione del rumore emesso dal motore diesel di una macchina di manovra ferroviaria modello D.245. Il funzionamento del sistema è basato sulla tecnica del controllo attivo del rumore. I comuni sistemi di attenuazione del rumore hanno migliore efficacia solo alle medie e alte frequenze, mentre le principali cause del disturbo sono imputabili alle componenti a bassa frequenza.

Il sistema proposto produce attenuazioni notevoli proprio alle basse frequenze; l'impiego contemporaneo dei sistemi tradizionali e del prototipo consente dunque di ottenere efficaci attenuazioni su tutto lo spettro del rumore. Le particolari caratteristiche del rumore generato dai locomotori diesel hanno consentito di realizzare un sistema digitale automatico che sfrutta il rumore generato dal motore come riferimento per il controllo.

Dalle misure fonometriche risulta che l'attenuazione introdotta dal prototipo è in media pari a 3 dBA sull'intero spettro di rumore e superiore a 12 dB sulla sola componente principale.

## 7. Bibliografia

[1] Takuji Mori, Niichi Nishiwi, Yoshihisa Takemori: "Application of AAC silencer to reduce automobile exhaust noise", Proceedings Inter-noise '91 Sidney Australia 2-4 dicembre 1991.

[2] F. Cotana, F. Rossi, L. Santarpia: "Riduzione dell'impatto ambientale nei trasporti: costruzione di un dispositivo per il controllo attivo allo scarico". Atti del 49° Congresso Nazionale ATI, Perugia 26-30 settembre 1994 vol. 4.

[3] F. Rossi, A. Nicolini, C. Tosti: "Misure del rumore prodotto da una macchina di manovra ferroviaria D.245 e a bordo di un treno ETR500", Collana Tecnico-Scientifica CIRIAF, Quaderno n. 13, Perugia, Aprile 2001.

[4] Velodyne Acoustics Inc.: "*HGS series – powerful & patented series, sized down*", [www.velodyne.com](http://www.velodyne.com).

[5] M. Felli, F. Cotana, F. Rossi: "*Un prototipo per il controllo attivo del rumore dei gruppi elettrogeni*", Atti del XXV Congresso AIA, Perugia, 21-23 Maggio 1997.

[6] F. Rossi: "*Active noise control technique to improve engine efficiency*", Energy and Environment 2002, Capri, 6-8 Giugno 2002.

[7] X. Qiu, C.H. Hansen: "*An algorithm for activecontrol of transformer noisewith on-line cancellation path modelling based on the perturbation method*", Journal of Sound and Vibration, 240(4), 647-665, 2001.

[8] Mario Rossi: "*Acoustic and electroacoustic*", Artec House, 1988.