

Associazione
Termotecnica
Italiana

Sezione
Umbria

49^o

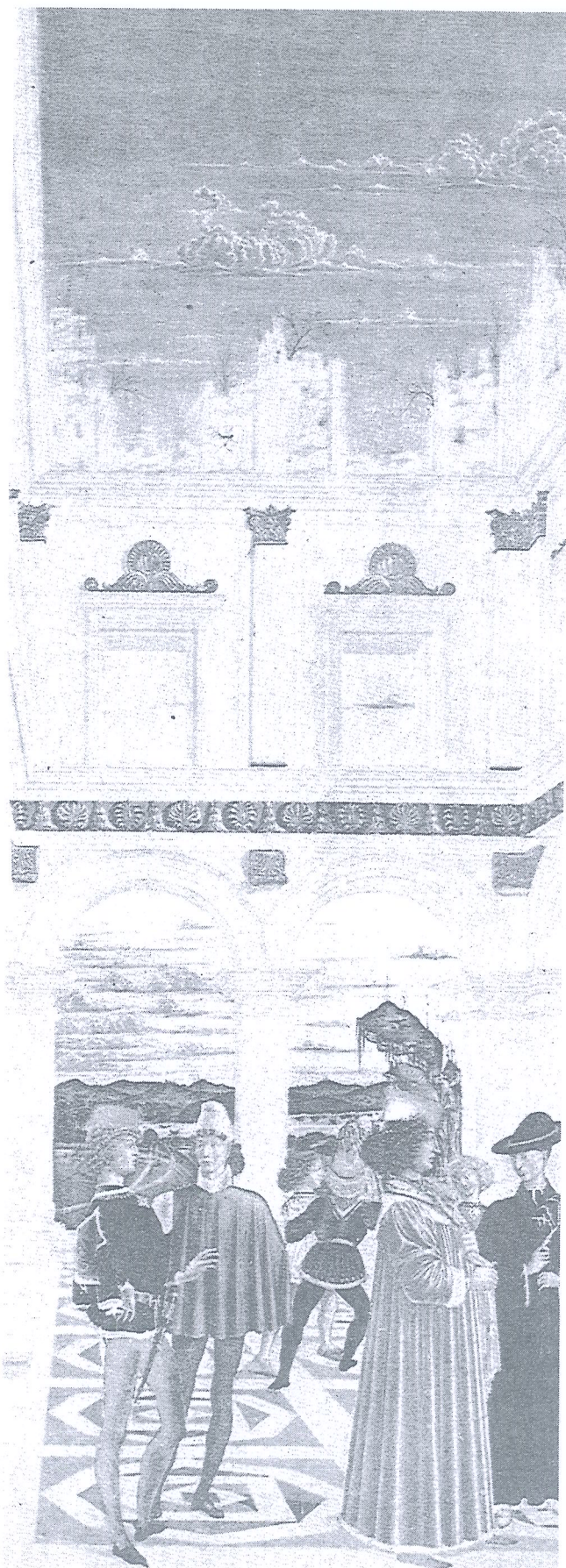
Congresso Nazionale ATI

49th ATI National Congress

Perugia, 26-30 Settembre 1994

estratto

**ATTI DEL CONGRESSO
CONGRESS PROCEEDINGS**



Riduzione dell'impatto ambientale nei trasporti: costruzione di un dispositivo per il controllo attivo del rumore allo scarico

F. Cotana*, F. Rossi*, L. Santarpia**

*Istituto di Energetica, Università degli Studi di Perugia, Strada S.Lucia Canetola 06125 Perugia

**Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Via Eudossiana 18. 00184 Roma

Riassunto

Le tradizionali marmitte di scarico, nei motori a combustione interna a quattro tempi, introducono una significativa diminuzione di rendimento, poiché incrementano il lavoro del ciclo di lavaggio del motore [1].

L'impiego di una marmitta innovativa, basata su tecniche di controllo attivo del rumore, consentirebbe un recupero di rendimento ovvero, in alternativa, un ulteriore abbattimento del livello sonoro.

Il sistema proposto è una tipica applicazione del controllo attivo; esso è costituito da due altoparlanti, i quali producono un segnale acustico uguale a quello prodotto dal motore, ma in opposizione di fase. Un particolare condotto di scarico permette che detto segnale ed il rumore del motore interferiscano distruttivamente fra loro all'uscita del condotto, annullandosi reciprocamente. Le prestazioni del sistema sono state verificate per mezzo di un banco di prova, ottenendosi i seguenti risultati:

-l'attenuazione media del rumore con il controllo attivo è circa uguale a quella ottenibile con sistemi tradizionali;

-la nuova marmitta proposta agisce anche a frequenze molto basse, per le quali le marmitte tradizionali sono inefficaci.

L'impiego della nuova marmitta può consentire un incremento del rendimento globale del motore dell'ordine del 5% rispetto all'impiego delle marmitte tradizionali. La nuova marmitta, infine, ha il vantaggio di mantenere pressoché inalterate le proprie prestazioni nel tempo, non essendo soggetta alle comuni cause di deterioramento delle marmitte tradizionali.

1. Scopo del lavoro

Le perdite energetiche nelle marmitte di scarico provocano una significativa diminuzione del rendimento dei motori a combustione interna a quattro tempi. D'altra parte, la presenza della marmitta è necessaria, sia ai fini di una riduzione delle emissioni inquinanti gassose, sia ai fini della limitazione del livello di rumore emesso [2].

Nel presente lavoro si propone un nuovo sistema di limitazione del rumore allo scarico, fondato sull'applicazione di tecniche di controllo attivo, mediante le quali si ottiene una limitazione delle emissioni acustiche dell'ordine di quella realizzabile con le marmitte tradizionali, ma con il grande vantaggio di non interferire sul deflusso dei gas allo scarico e, quindi, di non avere effetti negativi sul rendimento del motore.

Il prototipo è costituito da un circuito elettronico, collegato ad un sensore di velocità di rotazione del motore, che alimenta due altoparlanti, installati in modo opportuno all'interno del condotto di scarico (vedi figg.3,4,5); questi generano un segnale acustico, denominato convenzionalmente antirumore, uguale in modulo ma opposto in fase a quello prodotto dal motore, così che si genera un'interferenza distruttiva a seguito della quale le emissioni acustiche si riducono notevolmente.

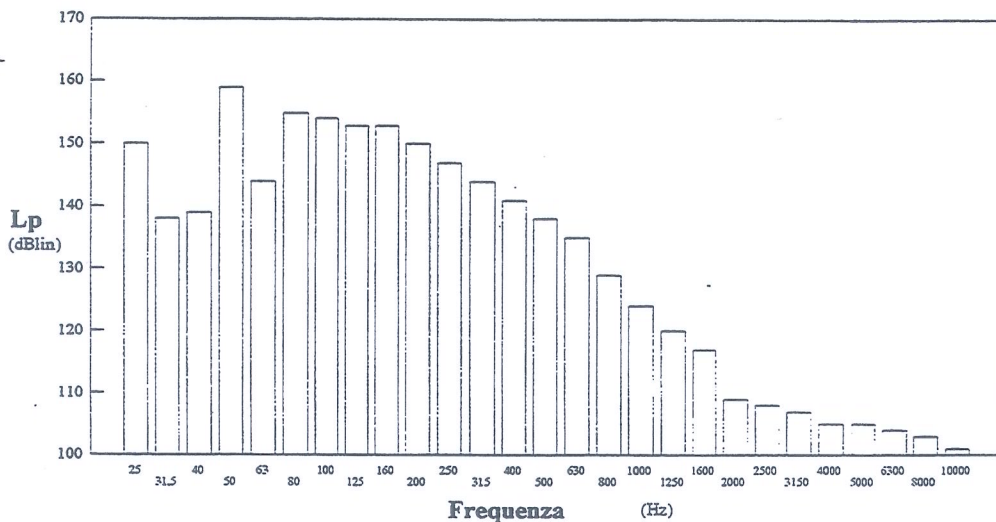


Fig. 1: Spettro tipico del rumore emesso da un motore a quattro tempi per un regime di rotazione di 3000 giri/minuto.

2. Caratteristiche della sorgente di rumore

In fig. 1 si riporta lo spettro tipico a bande di 1/3 di ottava del rumore prodotto da un motore a combustione interna a quattro tempi per un regime di 3000 giri/minuto e privo di sistema di scarico.

La parte intermedia dello spettro (da 200 a 2000 Hz) è quella più importante dal punto di vista della sensazione acustica; per tale intervallo di frequenze, un incremento del numero di giri del motore produce una traslazione verso le alte frequenze dello spettro, il quale, peraltro, non subisce sostanziali modifiche di forma [3].

Questa constatazione ha permesso di elaborare una semplice formula per la previsione delle caratteristiche del rumore emesso dal motore, la quale mette in relazione l'intensità, il regime di rotazione, l'alesaggio D [cm] e le caratteristiche elastiche della struttura [4]:

$$L_p[\text{dB(A)}] = A \log_{10} n_m + B \log_{10} D - C \quad (1)$$

dove:

A, B, C sono costanti tipiche del motore;

n_m = numero di giri/minuto;

D = alesaggio.

3. Le marmitte tradizionali

I sistemi di scarico tradizionali hanno la duplice funzione di attenuare il rumore prodotto dal motore e di limitare le emissioni gassose nocive verso l'esterno; questa seconda funzione avviene utilizzando un particolare dispositivo denominato marmitta catalitica, costituito da un volume, contenente nel suo interno una matrice a nido d'ape ricoperta da materiale catalizzante; questa permette ai gas combusti di partecipare a reazioni di ossidazione e di riduzione, eliminando così la maggior parte delle sostanze inquinanti [5].

L'attenuazione del rumore viene comunemente realizzata impiegando silenziatori a più stadi, ciascuno dei quali svolge una specifica funzione; in fig. 2 si riporta la tipica configurazione di un sistema di scarico.

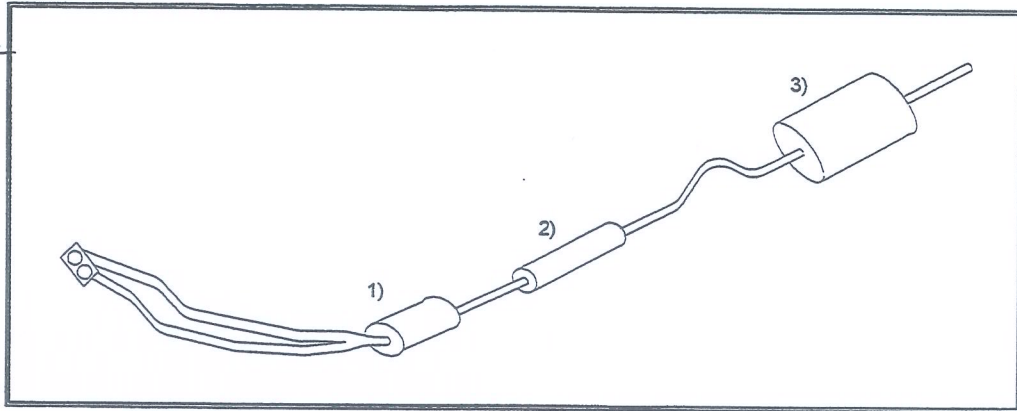


Fig.2: Schema a blocchi di un sistema di scarico tradizionale:

- 1) silenziatore frontale (alte frequenze)
- 2) silenziatore intermedio (medie frequenze)
- 3) silenziatore finale (basse frequenze)

Lo stadio n°1 è il silenziatore frontale, che produce attenuazione per le alte frequenze dello spettro (fra 2000 e 10000 Hz); gli stadi n°2 e n°3, intermedio e finale, agiscono rispettivamente sulle medie (fra 500 e 2000Hz) e sulle basse frequenze (fra 30 e 500Hz).

Nei moderni sistemi di scarico lo stadio frontale viene realizzato in modo da assolvere sia le funzioni acustiche che quelle catalitiche [5].

L'applicazione del dispositivo di scarico produce i seguenti effetti:

- a) perdita di potenza, in condizioni di massimo regime, variabile nel campo 5-15%;
- b) aumento della contro pressione allo scarico nel campo 10-50 KPa, a seconda del tipo di motore [4];
- c) aumento di consumo specifico di combustibile, dell'ordine del 10% [5];
- d) incremento di circa di 50 °C della temperatura massima del motore [3],[5];
- e) riduzione del livello di rumore di 50-60 dBlin [6].

L'efficacia del sistema, inoltre, decresce nel tempo, a causa del deterioramento meccanico del materiale fonoassorbente, delle ostruzioni causate dai depositi carboniosi e della corrosione prodotta dalla condensa di sostanze chimicamente aggressive [4].

Lo stadio n°3 di fig.2 contribuisce per più del 50% all'incremento della contropressione prodotto dall'intero sistema di scarico [3] e produce anche una significativa attenuazione del rumore (circa 20 dBlin).

4. Il prototipo di marmitta elettronica

Il sistema proposto nel presente lavoro è basato sulla tecnica del controllo attivo e può essere impiegato in sostituzione dello stadio finale n.3 del sistema di fig.2. In esso si distinguono una parte meccanica ed un sistema di controllo elettronico: entrambi sono stati realizzati presso i laboratori di Acustica e Termotecnica dell'Università degli Studi di Perugia ed oggetto di brevetto.

4.1. Dispositivo meccanico.

Il dispositivo meccanico è mostrato nella foto delle figg.3,4,5,6. L'espulsione dei gas di scarico avviene a tubo libero, attraverso un condotto a sezione circolare (lung=800mm, Φ_{int} =30mm, Φ_{ext} =35mm), che mette in comunicazione l'ingresso della marmitta elettronica con l'ambiente esterno.

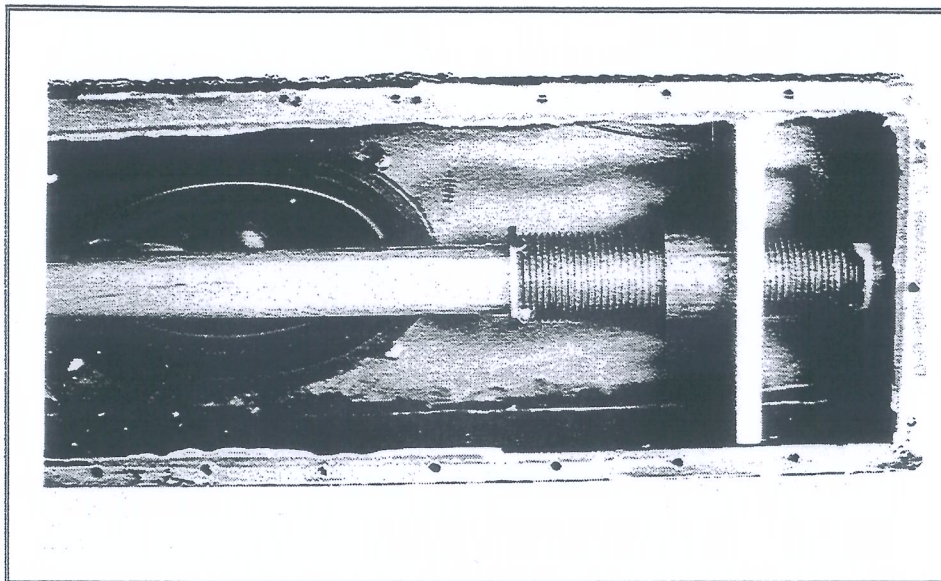


Fig. 3: Foto della marmitta elettronica: particolare dell'interno della camera di risonanza. A destra è visibile la parete mobile che consente di variare il volume della camera: lo spostamento della parete è ottenuto mediante la rotazione del tubo di scarico.

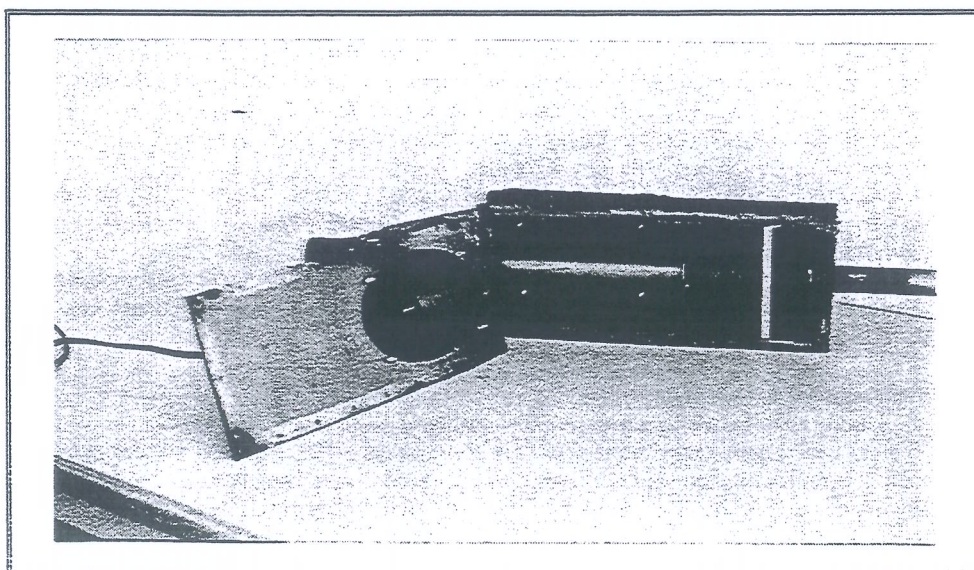


Fig. 4: Foto della marmitta elettronica: particolari costruttivi

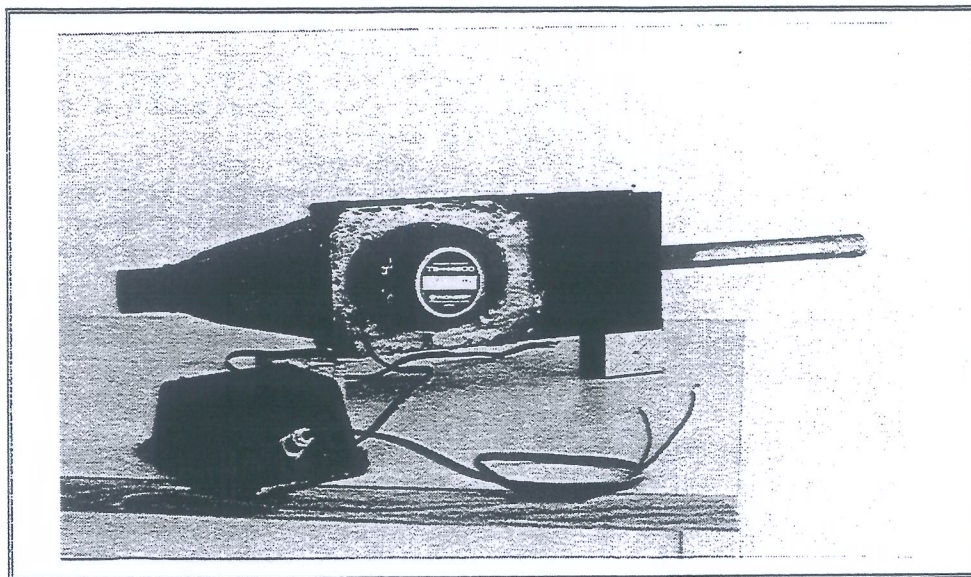


Fig.5: Foto di particolari della marmitta elettronica: altoparlante e coperchio

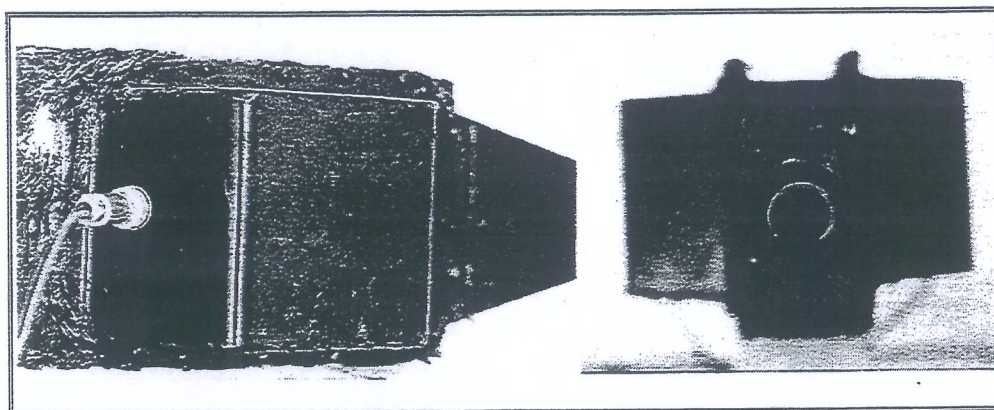


Fig.6: Foto di particolari della marmitta elettronica: (a sin.) coperchio e connessione altoparlante, (a destra) sezione di uscita in cui si ha l'interferenza distruttiva rumore-antirumore.

Attorno al condotto di scarico è stata costruita una camera risonante, avente forma di parallelepipedo ($L \times P \times H = 330 \times 110 \times 65 \text{ mm}$); su due pareti opposte di tale camera sono installati due altoparlanti (mod. TS-H4600 Pioneer, pot. 60W, dim. 150x100 mm) di tipo ellittico; due coperchi in metallo, aventi nel loro interno materiale fonoisolante, limitano le emissioni acustiche verso l'esterno da parte degli altoparlanti stessi. Il numero e la forma degli altoparlanti sono stati scelti in modo da ridurre al minimo l'ingombro della marmitta a parità di potenza acustica installata nello spettro delle basse frequenze (30-500 Hz).

La potenza acustica installata è superiore a quella generata da un motore a 4 tempi, di media cilindrata, nello spettro delle basse frequenze (30-500 Hz). In corrispondenza dell'uscita del condotto di scarico la camera risonante è rastremata, fino a raggiungere una sezione circolare avente diametro di 12 mm superiore a quello del condotto di espulsione; in tal modo l'area dell'anello è circa uguale a quella del tubo di scarico. In fig.6 è visibile il particolare della sezione terminale del condotto di scarico.

L'antirumore prodotto dagli altoparlanti si propaga nello spazio compreso fra il condotto di espulsione dei gas e la sezione rastremata della camera di risonanza; questa è dotata di un setto mobile, che consente di variare il volume in cui avviene la propagazione acustica, variando di conseguenza anche i valori delle frequenze di risonanza: si può così valutare l'influenza del volume sulle prestazioni della marmitta elettronica. Nel sistema proposto i gas di scarico non entrano mai in contatto con le membrane degli altoparlanti né, più in generale, con la camera di risonanza; il tubo di scarico, nel tratto in cui attraversa longitudinalmente la camera di risonanza, è coibentato per limitare il valore della temperatura all'interno della camera stessa.

4.2. Sistema di controllo

In fig.7 si riporta uno schema a blocchi del sistema di controllo, costituito dai seguenti componenti:

- a) sensore;
- b) filtro passa banda;
- c) amplificatore di ingresso;
- d) circuito di controllo;
- e) generatore di segnali controllato in fase, frequenza ed ampiezza;
- f) amplificatore finale di potenza.

Il sensore *a)* è costituito da un generatore di impulsi elettrici, che produce un numero di impulsi per unità di tempo proporzionale alla velocità di rotazione dell'albero motore. Il filtro passa banda *b)* consente di selezionare le componenti in frequenza desiderate. Il segnale in uscita da *b)* viene amplificato dal dispositivo *c)*. Il circuito di controllo *d)* produce uno sfasamento del segnale proveniente da *c)* e genera il segnale di controllo per il generatore *e)*; L'uscita del generatore *e)* è collegata all'ingresso dell'amplificatore *f)*, che fornisce la potenza necessaria per alimentare gli altoparlanti presenti nella marmitta elettronica. Il segnale acustico prodotto dagli altoparlanti ha le seguenti caratteristiche:

- ampiezza proporzionale a quella della componente fondamentale del segnale acustico prodotto dal motore;
- frequenza uguale e fase opposta alla fondamentale del segnale acustico prodotto dal motore [6],[7].

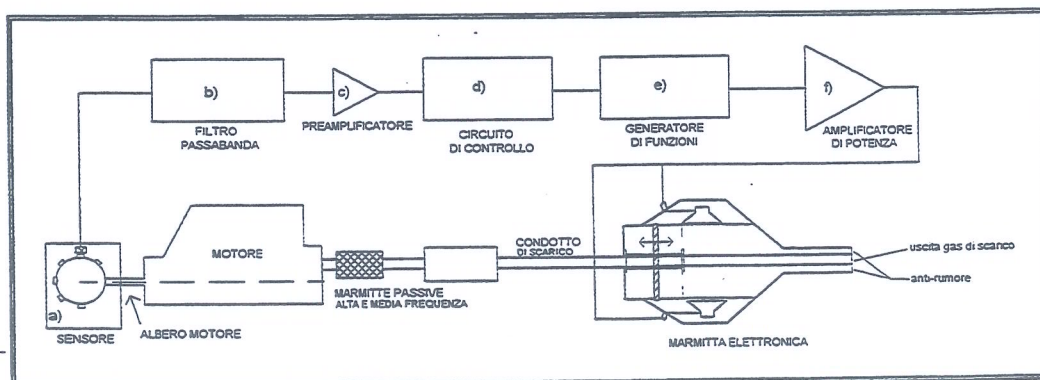


Fig. 7: Schema a blocchi del sistema di controllo

5. Modalità di funzionamento

5.1. Generalità

Il sistema di controllo si basa su una tecnica di ricostruzione del segnale di antirumore. Il generatore *e)* (rif. fig.7) genera un segnale elettrico sinusoidale, di frequenza uguale alla frequenza fondamentale prodotta dal motore e fase opposta [7],[9]. La fase del segnale è "agganciata" al regime di rotazione del motore mediante il sensore *a)* ed i circuiti *b)*, *c)*, *d)*; ciò permette di mantenere costantemente il segnale antirumore sfasato di 180° rispetto alla componente fondamentale del rumore.

L'interferenza distruttiva all'uscita del condotto di scarico produce pertanto un'attenuazione della sola componente principale del rumore disturbante [6],[9]. Lo spettro del rumore prodotto dai motori a combustione interna a quattro tempi varia in funzione del numero di cilindri, della cilindrata e del regime di rotazione del motore: soltanto una percentuale della potenza acustica totale è associata alla frequenza fondamentale [6],[10]. Pertanto il sistema proposto presenta un limite teorico dell'attenuazione, corrispondente alla percentuale di potenza acustica associata alla frequenza fondamentale dello spettro del rumore.

Il sistema non prevede il controllo automatico dell'ampiezza del segnale di antirumore ed è pertanto applicabile soltanto a regimi di funzionamento del motore stazionari; in tal caso l'ampiezza del segnale di antirumore può essere impostata manualmente operando sul generatore di segnali *e)* di fig.7.

5.2. Prove di laboratorio

Il sistema è stato sperimentato sul banco di prova mostrato in fig.9, il cui schema a blocchi è riportato in fig.8. Il banco è stato realizzato secondo le indicazioni della Norma UNI 9434 [13].

Un altoparlante (120 W r.m.s) è installato all'interno di una cassa cubica di lato 50 cm, a costituire una camera di risonanza isolata dall'ambiente esterno. Al centro di una parete laterale del cubo è stato praticato un foro per consentire l'introduzione del condotto di scarico. Il condotto di sostituzione, previsto dalla norma UNI, coincide in questo caso con il condotto di scarico, costituito da un tubo libero a pareti rigide. L'altoparlante è alimentato da un amplificatore collegato ad un generatore di segnali, in grado di produrre spettri variabili a piacere.

Le prove sono state condotte inizialmente con toni puri e successivamente con uno spettro di rumore simile a quello prodotto da un motore a combustione interna a quattro tempi per un regime di funzionamento medio (3000 giri/min) [6],[12]; in questo caso, la potenza acustica prodotta dall'altoparlante che simula il rumore del motore è stata fissata in 10⁻³W; corrispondentemente, all'interno della camera di risonanza, è stato misurato un livello di rumore di circa 95dBlin.

L'uscita del generatore di segnale è inoltre collegata ad un circuito elettronico, che produce a sua volta un segnale con le seguenti caratteristiche:

- fase opposta a quella del segnale inviato all'altoparlante che simula il rumore del motore;
- ritardo di circa 3ms rispetto al segnale inviato all'altoparlante [9].

Tale ritardo consente di compensare i tempi di propagazione della perturbazione acustica all'interno del volume in cui è installato l'altoparlante e nel condotto di espulsione. L'uscita del circuito elettronico è collegata ad un secondo amplificatore che alimenta gli altoparlanti della marmitta elettronica. [7].

Le misure del livello di pressione sonora sono state eseguite mediante un fonometro (Larson-Davis mod.LD800B, classe 1), in corrispondenza dalla sezione terminale del condotto di scarico, come previsto dalla norma [13]. Inoltre è stato utilizzato un analizzatore di spettro in tempo reale, collegato all'uscita analogica del fonometro, per la misura dell'andamento istantaneo della pressione acustica e dello spettro di densità di potenza del segnale acustico.

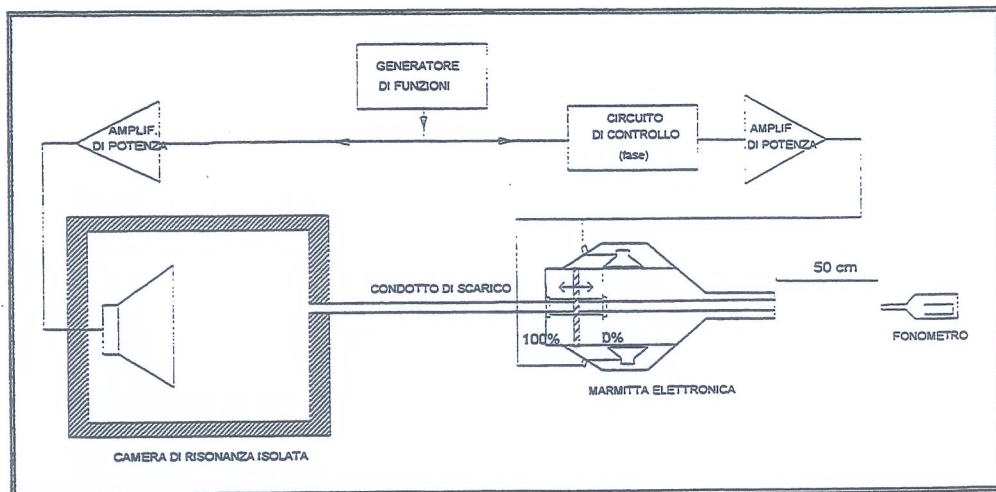


Fig. 8: Schema a blocchi del banco di prova con il quale si sono valutate le prestazioni della marmitta elettronica

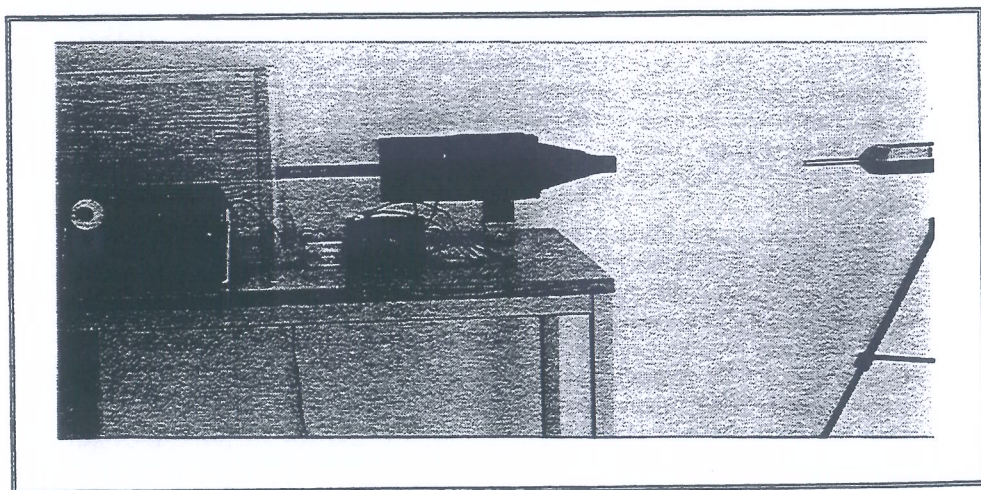


Fig.9:Foto del banco di prova

6. Aspetti energetici

Il sistema di controllo attivo proposto è assimilabile ad un tubo libero che mette in comunicazione i collettori di scarico con l'ambiente esterno.

In fig.10 si riporta il ciclo di lavaggio tipico di un motore a quattro tempi a combustione interna, per due diverse condizioni di contropressione determinate dai sistemi di scarico:

- dispositivo tradizionale di scarico marmitta tradizionale;
- sostituzione dello stadio finale di fig.2 con un tubo libero.

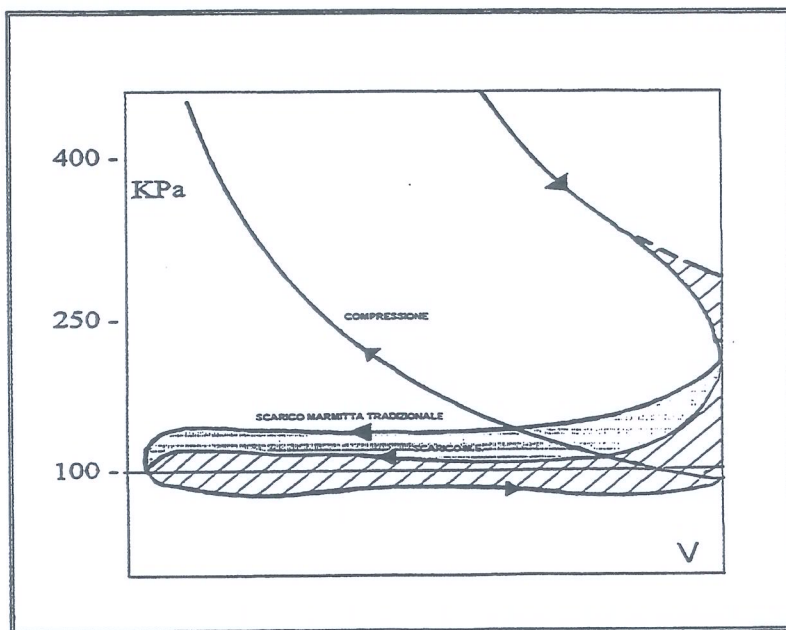


Fig.10: Ciclo di lavaggio di un motore a combustione interna a quattro tempi per due diverse condizioni di controcompressione allo scarico.

Nel grafico di fig.10 la somma dell'area retinata e dell'area tratteggiata rappresenta il lavoro che il motore, dotato di marmitta passiva, deve compiere per realizzare il ciclo di lavaggio (scarico ed aspirazione).

L'impiego del tubo libero produce una diminuzione di lavoro durante lo scarico, rappresentata dall'area retinata di fig.6, stimabile in circa il 10% rispetto al lavoro totale prodotto dal motore [6],[10].

Lo stadio finale di un sistema di scarico tradizionale produce una perdita di potenza massima del motore variabili dal 5 al 10% rispetto allo scarico diretto nell'ambiente, a seguito dell'incremento della controcompressione di scarico [3],[4],[5].

L'impiego del tubo libero in sostituzione dello stadio finale della marmitta tradizionale produce una diminuzione della temperatura massima del motore dell'ordine di 40°C ed un incremento del rendimento globale dell'ordine del 5 %, con diminuzione dei consumi specifici di carburante [3],[4],[5].

7. Risultati Sperimentali

I risultati di seguito riportati sono stati ottenuti nel corso delle prove descritte al punto 5.2.

Il setto mobile della marmitta elettronica è collocato in posizione centrale; il volume di risonanza è diviso in due parti uguali. Nelle fig.11 e 12 sono rappresentati gli andamenti nel tempo di pressione acustica e densità di potenza sonora all'uscita quando il controllo attivo è in funzione (linea continua) e disattivato (linea tratteggiata).

Dal confronto degli andamenti nelle figg.11 e 12 si nota che l'applicazione della marmitta elettronica produce un'attenuazione del rumore di circa 20 dBIn, paragonabile ai valori tipici introdotti dallo stadio finale dei sistemi tradizionali.

In fig.13 si riporta l'andamento del livello di rumore con sistema di controllo della marmitta elettronica acceso (curve a₁, a₂, a₃) e spento (curva b), in funzione della frequenza.

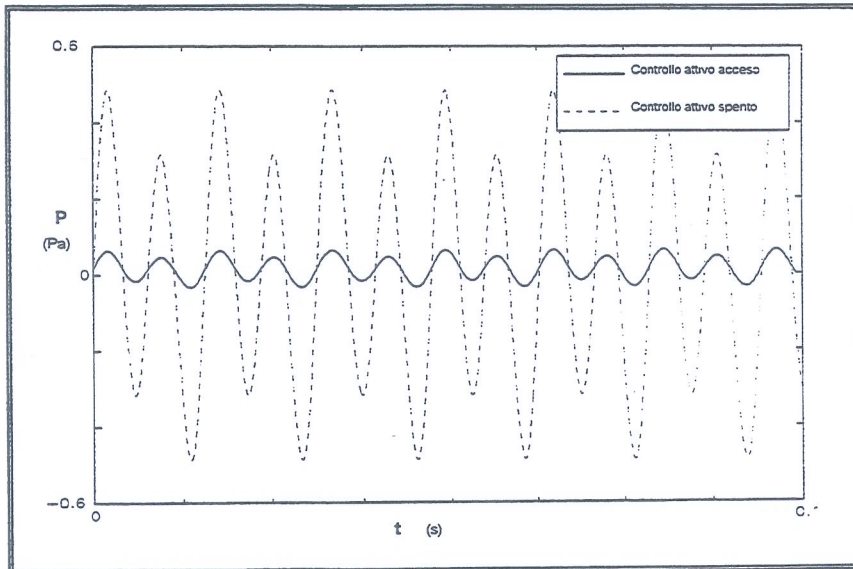


Fig.11: Andamento temporale della pressione acustica a 50 cm dalla sezione di uscita del condotto di scarico con sistema di controllo acceso e spento.

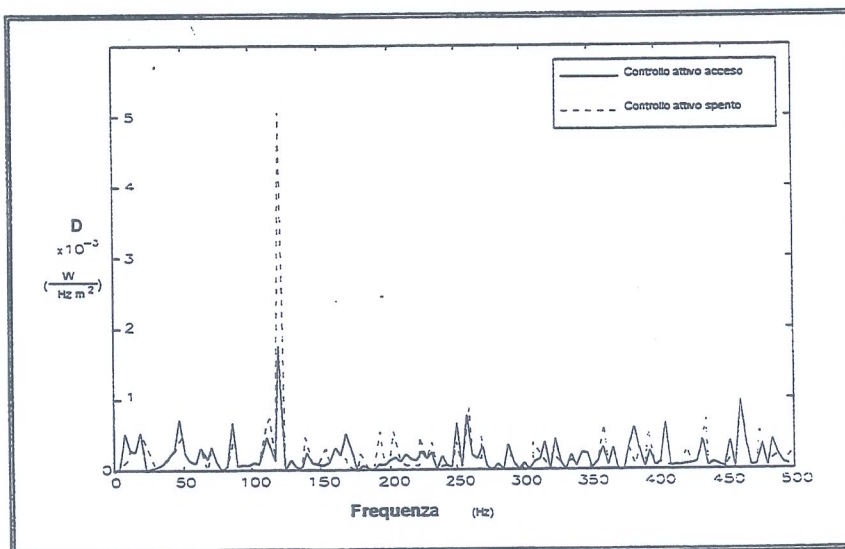


Fig.12: Andamento dello spettro di densità di potenza del segnale acustico a 50 cm dalla sezione di uscita del condotto di scarico con sistema di controllo acceso e spento.

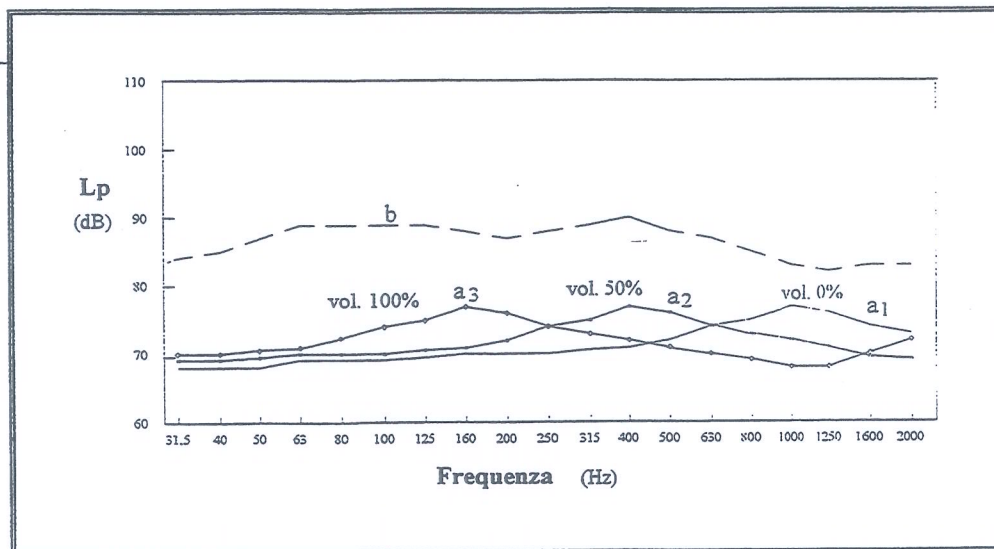


Fig. 13: Andamento del livello di pressione acustica a 50 cm dalla sezione di uscita del condotto di scarico al variare della frequenza in diverse condizioni:

a_{1,2,3}) controllo acceso per diversi volumi della camera di risonanza (0%, 50%, 100%);
 b) scarico libero.

Le curve a₁, a₂, a₃ sono ottenute, con controllo acceso, al variare delle dimensioni del volume della camera di risonanza; si hanno i seguenti risultati:

- con volume pari al 0% (curva a₁), si ha un incremento del livello rumore di 3 ÷ 6 dB in per le frequenze comprese tra 500 e 2.000 Hz;
- con volume pari al 50% (curva a₂), si ha un incremento del livello rumore di 3 ÷ 6 dB in per le frequenze comprese tra 250 e 800 Hz;
- con volume pari al 100% (curva a₃), si ha un incremento del livello rumore di 3 ÷ 6 dB in alle basse frequenze tra 100 e 300 Hz.

Le diverse risposte in frequenza della marmitta elettronica al variare del volume della camera di risonanza possono essere utilmente impiegate per realizzare un progetto ottimizzato della marmitta stessa.

8. Conclusioni

Presso i Laboratori di Acustica e Termotecnica dell'Università di Perugia è stato realizzato un prototipo di marmitta elettronica per l'attenuazione del rumore allo scarico di motori a quattro tempi a combustione interna, basato sulla tecnica del controllo attivo del rumore.

La marmitta elettronica consente di ottenere le medesime prestazioni della marmitta tradizionale, eliminando tuttavia alcuni inconvenienti, quali la perdita di potenza e di rendimento del motore.

Il prototipo è stato sperimentato per mezzo di un banco di prova, appositamente costruito nei laboratori dell'Università di Perugia. Si è misurata un'attenuazione del rumore all'incirca pari a quella delle marmitte tradizionali.

Un particolare accorgimento adottato nel sistema proposto consiste nell'adozione di una camera a volume variabile, per mezzo della quale è possibile adeguare la risposta del sistema di abbattimento del rumore a seconda delle esigenze imposte dalle caratteristiche del motore stesso e delle altre componenti

del sistema di scarico. Impiegando un sistema così ottimizzato è possibile dunque, a parità di riduzione del livello di rumore, ottenere un incremento di rendimento del motore dell'ordine del 5%.

Il sistema proposto è di semplice realizzabilità e costi assai contenuti, paragonabili a quelli di una marmitta passiva, in una produzione di serie. Si ritiene pertanto che detto sistema possa essere meritevole di considerazione anche in vista di applicazioni su scala industriale.

9. Bibliografia

- [1] "Rapporto sull'energia 1990", Sez. Statistica CNR, ENEA, ENEL, ENI;
- [2] D.L. 30.04.92 n°285, "Nuovo Codice della Strada" Supp. Ord. G.U. n.114 del 18.05.92;
- [3] G.Ferrari: "Motori a combustione interna". Il Capitello, Torino 1992;
- [4] A. Beccari - C. Caputo: "Motori termici volumetrici". Macchine a Fluido 3. UTET, Torino 1987.
- [5] J.B. Heywood: "Internal Combustion Engine Fundamentals". Mc Graw Hill, 1988;
- [6] S.W.Coates - G.P.Blair: "Further Studies of Noise Characteristics of Internal Combustion Engines Exhaust System". S.A.E. paper n.740713,1974;
- [7] S.J. Elliott - P.A. Nelson: "Active Noise Control". IEE Signal Processing Magazine. Ottobre 1993;
- [8] ISO 362: "Acoustic Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles - Engineering Methods". 1981;
- [9] F. Cotana - F. Rossi - L. Santarpia: "Noise Control on Air Ducts: Evolution of Active Systems an Perspectives". Internoise '93, Leuven - Belgium, Agosto 1993;
- [10] C. Grimaldi - G.Bidini - U.Broggi: "Motorcycle Mufflers Performances: Predictions and Experimental Verification". Fluidmechanics, Combustion, Emissions and Reliability in Reciprocating Engines. Capri, 14-19 settembre 1992;
- [11] A.G.Galaitis - E.K. Bender: "Measurements of the Acoustic Impedence of an Internal Combustion Engine". Journal of Acoustic Society. Am.,vol.58,1995;
- [12] G.C.Ferrari - A. Onorati: "A Non-Linear Simulation Model for Engine Silencer". Fluidmechanics, Combustion, Emissions and Reliability in Reciprocating Engines. Capri, 14-19 settembre 1992;
- [13] UNI 9434 "Misura della perdita di inserzione sonora di un silenziatore - Metodo di controllo" 04.04.1989;
- [14] Direttiva CEE n. 70/157 del 06.02.70 Concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative al livello sonoro ammissibile e al dispositivo di scappamento dei veicoli a motore. G.U. CEE n. L 42 del 23.02.1970;
- [15] Direttiva CEE n. 84/372 del 03.07.84 Che adegua al progresso tecnico la direttiva 70/157/CEE G.U. CEE n. L 196 del 26.07.1984;
- [16] Direttiva CEE n. 84/424 del 03.09.84 Che modifica la direttiva 70/157/CEE G.U. CEE n. L 238 del 06.09.1984.