

STUDIO TEORICO SPERIMENTALE DI UN SILENZIATORE INNOVATIVO PER LO SCARICO DI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

Andrea Nicolini

Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Perugia

SOMMARIO

I silenziatori per lo scarico dei motori a combustione interna alternativi rappresentano solitamente un compromesso tra la necessità di attenuare al massimo il rumore in uscita e di ridurre al minimo le perdite di carico, gli ingombri, i pesi ed i costi del dispositivo. Un'elevata attenuazione del livello di rumore infatti è quasi sempre accompagnata da un incremento delle perdite di carico e quindi un aumento della pressione media di uscita dei gas dal motore, con una riduzione significativa del rendimento ed un incremento dei consumi energetici. Nelle marmitte tradizionali, quando il flusso dei gas da espellere è rilevante, come nel caso dei motori diesel di grossa cilindrata, le dimensioni della marmitta assumono valori ragguardevoli. La riduzione degli ingombri della marmitta risulta piuttosto difficile poiché i tentativi in questo senso si traducono spesso in un decadimento delle prestazioni acustiche del silenziatore.

Nel presente lavoro viene studiata dal punto di vista teorico e sperimentale una nuova tipologia di marmitta la cui particolare geometria, spiraleforme, consente di ridurre drasticamente gli ingombri e, a parità di pressione media allo scarico del motore, garantisce prestazioni di abbattimento acustico uguali o superiori a quelle delle tradizionali marmitte. Come mostrato in Fig. 1, l'ingresso dei fumi avviene al centro di una spirale mentre l'uscita avviene da tratti di alcune spire più esterne della spirale stessa; in tal modo i flussi di gas che hanno percorso diversi cammini si sommano all'uscita del dispositivo, dando luogo ad interferenze acustiche distruttive. Il nuovo dispositivo presenta il vantaggio di una uniforme evacuazione ed un minor raffreddamento dei fumi; nei silenziatori tradizionali, invece, la presenza di cavità di espansione determina la condensazione parziale dei gas che costituisce un potenziale pericolo per la corrosione del silenziatore stesso. L'elemento fondamentale della nuova marmitta è una spirale, che può essere facilmente realizzata anche per estrusione con materiale ceramico, ciò fa prevedere ridotti costi di realizzazione in vista di un impiego su larga scala. Nello studio della nuova marmitta si è fatto ricorso alle analogie tra circuiti acustici e circuiti elettrici a costanti concentrate; le tecniche di analisi e sintesi dei filtri elettrici sono state utilizzate unitamente ai risultati di prove sperimentali. In particolare, dalla misura delle prestazioni acustiche di un prototipo reale, è stata individuata la funzione di trasferimento del dispositivo e da questa è stata fatta la sintesi del circuito acustico equivalente a costanti concentrate. Il modello circuitale ottenuto ha consentito di interpretare i principali parametri costruttivi che influenzano la risposta del dispositivo ed ha permesso di ottimizzare le prestazioni acustiche della marmitta.

1. MARMITTE TRADIZIONALI ED INNOVATIVE

Le marmitte sono silenziatori in grado di attenuare un suono trasmesso attraverso un condotto mediante due principali meccanismi: la dissipazione o la riflessione dell'energia acustica; se nel silenziatore è prevalente uno o l'altro meccanismo il dispositivo è di tipo dissipativo o di tipo reattivo. Nel primo caso la riduzione del rumore è legata principalmente alla presenza di materiali con spiccate proprietà fonoassorbenti; le applicazioni riguardano l'attenuazione del rumore a larga banda tipico dei motori a jet, dei ventilatori o dei condotti di distribuzione dell'aria. Nel secondo caso, le prestazioni acustiche del silenziatore sono determinate principalmente dalla sua forma geometrica, costituita di solito da una o più cavità risonanti, camere e tratti di tubo, che ostacolano la trasmissione dell'energia acustica riflettendola indietro verso la sorgente. L'efficacia di tali dispositivi è purtroppo legata ad uno specifico campo di frequenza; il vantaggio invece è rappresentato dalla mancanza (o quasi) di materiali fonoassorbenti che ne permette l'applicazione anche ad elevate temperature. Il caso tipico è costituito dalle marmitte per i motori a combustione interna alternativi.

In tutti i mezzi di trasporto che utilizzano motori a combustione interna alternativi, il terminale di scarico costituisce un importante componente del veicolo. Negli ultimi anni, a seguito delle nuove Direttive Europee e delle leggi nazionali per la lotta all'inquinamento acustico (Legge Quadro sull'inquinamento acustico, 1995), si è fatta sempre più pressante l'esigenza di ridurre il rumore emesso dai veicoli a motore. Per raggiungere tale obiettivo, specie nei motori diesel di media e grossa cilindrata utilizzati nel trasporto merci stradale ed in alcuni casi anche ferroviario, le marmitte assumono dimensioni ragguardevoli. Il dispositivo silenziatore infatti, oltre ad attenuare il rumore allo scarico, deve garantire l'evacuazione dei fumi con perdite di carico, tra ingresso ed uscita, molto contenute. Se questo non avviene, l'incremento della pressione all'ingresso della marmitta riduce sensibilmente il rendimento del motore con un incremento dei consumi energetici specifici.

La ricerca in questo campo, oltre all'ottimizzazione delle tradizionali marmitte passive, è stata recentemente indirizzata anche verso lo studio dei silenziatori elettroacustici basati sul controllo attivo del rumore (Cotana et al., 1997). Tali dispositivi tuttavia non costituiscono ancora una reale alternativa sia per i costi ancor troppo elevati sia per le prestazioni non ancora soddisfacenti, specie per i regimi di rotazione variabile.

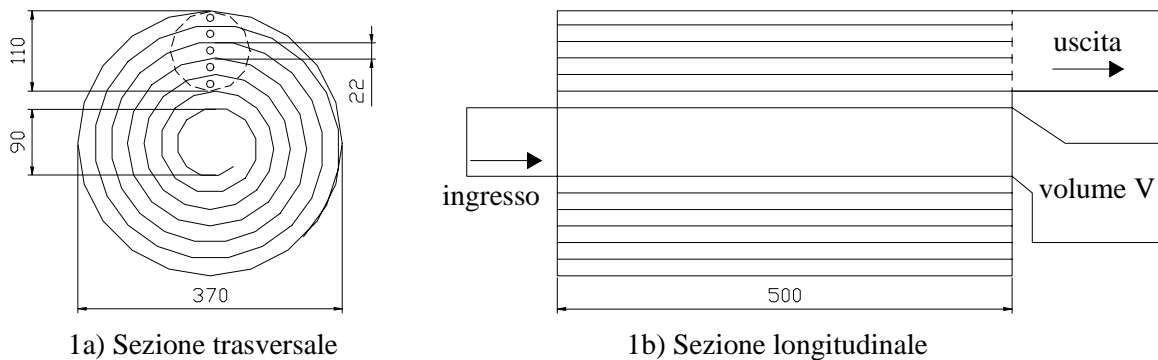


Fig. 1 – Sezioni della marmitta a spirale

Nel presente lavoro viene presentata una nuova tipologia di marmitta reattiva di tipo passivo che sfrutta il principio dell'interferenza distruttiva tra onde acustiche. Come mostrato nella Fig. 1, la nuova marmitta ha un condotto rettangolare avvolto a spirale; i gas di scarico entrano al centro della spirale e fuoriescono dalle ultime spire della spirale stessa attraverso un tubo di raccordo. Il diametro delle spire è stato progettato in modo tale che, nel campo di frequenze tipiche del rumore che si vuole attenuare, la differenza dei percorsi acustici produce uno sfasamento di circa 180 gradi tra le onde sonore che interferiscono all'uscita della marmitta. In tal modo, flussi di gas che hanno percorso diversi cammini si sommano acusticamente interferendo in modo distruttivo all'uscita della marmitta dando luogo ad una rilevante riduzione del livello di rumore globalmente emesso.

La cavità risonante presente lungo l'asse centrale della spirale permette, al variare del volume, la messa a punto e l'ottimizzazione del dispositivo.

2. MODELLO ACUSTICO DELLA MARMITTA ED ANALOGIE ELETTRICHE

Negli ultimi quarant'anni i silenziatori e lo studio delle onde acustiche nei condotti sono stati al centro di numerosi programmi di ricerca che hanno migliorato la comprensione dei fenomeni di base e hanno consentito di individuare accurate metodologie di progetto. Nel 1939 (Morse, 1939) è stata sviluppata la teoria di base della trasmissione del suono in condotti in assenza di flusso; nel 1954 (Davis et al., 1954) è stata condotta una sistematica ed approfondita valutazione teorica e sperimentale delle prestazioni acustiche di marmitte in assenza di flusso. Ricerche successive hanno approfondito l'influenza, sulle prestazioni acustiche delle marmitte, di importanti fattori quali il flusso uniforme di gas, la temperatura, i gradienti di pressione e di temperatura. Molti lavori sono pubblicati in forma di singoli articoli in riviste internazionali o sono riportati in capitoli di manuali ingegneristici, ovvero costituiscono interi testi come il libro "sull'acustica dei condotti e delle marmitte" (Munjal, 1987) che affronta in modo completo e sistematico la problematica.

Nello studio della trasmissione di segnali acustici attraverso condotti di solito vengono fatte alcune ipotesi che riducono notevolmente la complessità dei modelli matematici.

Se la lunghezza d'onda è notevolmente maggiore rispetto alle dimensioni trasversali del condotto, il moto del gas, conseguente alla perturbazione acustica, avviene principalmente in direzione dell'asse del condotto stesso e quindi il problema è ricondotto al caso unidimensionale.

La velocità media di oscillazione delle particelle di gas $u(t,x)$ e la pressione sonora $p(t,x)$, conseguenti al fenomeno acustico, possono ritenersi piccole rispettivamente rispetto alla velocità del suono c e alla pressione totale del gas P . In tal caso, la propagazione può essere descritta da un'equazione del primo ordine (eq. Laplace – D'Alambert); il condotto si comporta analogamente ad una linea elettrica di trasmissione a cui può essere applicata la teoria dei circuiti elettrici in corrente alternata. Gli elementi del condotto possono essere, inoltre, rappresentati per analogia, con una rete elettrica passiva a costanti concentrate realizzata con induttanze, capacità e resistenze.

Non sempre le ipotesi precedenti sono ben verificate; nel caso delle marmitte infatti la pressione all'ingresso del condotto di scarico dei motori a combustione interna alternativi può raggiungere valori di picco anche pari a metà della pressione statica P , sebbene il valore r.m.s. solitamente rimane inferiore ad $1/10$ di P . Ciò nonostante l'approccio con l'analogia dei circuiti elettrici a costanti concentrate rimane il metodo più largamente utilizzato nello studio del comportamento acustico delle marmitte (Galatsis e Ver, 1992); di seguito si fa pertanto riferimento a questo tipo di approccio per la definizione del modello circuitale della nuova marmitta.

2.1 Circuito acustico

Se in prima approssimazione si considerano le pareti della spirale infinitamente rigide, l'energia trasmessa da una spira all'altra attraverso le pareti può essere trascurata. In tal caso il comportamento della marmitta non cambia se la spirale viene rettificata ed assume la forma di un condotto rettangolare come riportato in Fig. 2. Dalla stessa figura si possono individuare gli elementi acustici principali: a) il condotto di ingresso di sezione circolare, b) la spirale costituita da un condotto rettangolare, c) le derivazioni di uscita dei flussi dei gas, d) il condotto di uscita finale dei gas di sezione circolare, e) una cavità risonante per la taratura del dispositivo.

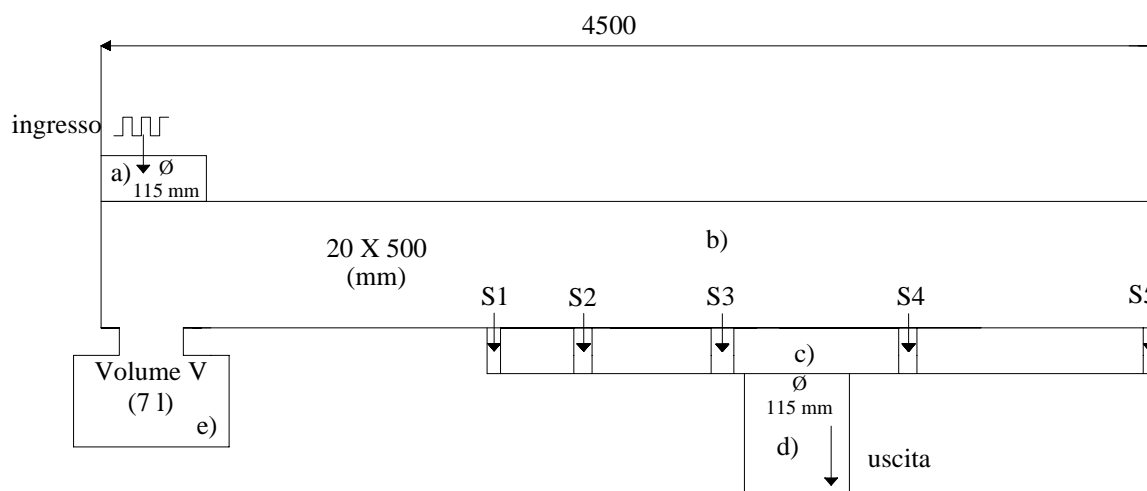


Fig. 2 - Circuito acustico equivalente della marmitta a spirale

2.2 Circuito elettrico equivalente

Globalmente la marmitta può essere vista come un quadripolo o rete due porte. La porta di ingresso è infatti costituita dal condotto iniziale che convoglia i gas di scarico del motore verso la marmitta a spirale. La porta di uscita è costituita dall'apertura del condotto di scarico attraverso la quale fuoriescono, verso l'ambiente, i fumi ed il rumore residuo che la marmitta stessa non è riuscita ad abbattere.

Le grandezze che caratterizzano le due porte sono rispettivamente la pressione acustica p (analoga della tensione elettrica) e la portata acustica (ρSu), analoga della corrente elettrica, data dal prodotto

tra la densità dei gas, la sezione del condotto e il valore efficace della velocità di oscillazione delle particelle di gas (oscillazione associata al fenomeno acustico).

L'analisi del circuito acustico di Fig. 2, mostra come si possa associare, attraverso l'analogia elettrica, ad ogni elemento acustico un equivalente circuito elettrico. In particolare:

- ad ogni tratto di condotto a sezione costante si può associare una inertanza acustica (equivalente della induttanza) il cui valore è dato da

$$L = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

dove ρ è la densità del gas, l è la lunghezza del tratto considerato, S è l'area della sezione;

- ad ogni cavità chiusa corrisponde una cedevolezza equivalente della capacità elettrica il cui valore è dato da

$$C = \frac{V}{\rho c^2}.$$

Infine, se ai componenti elettrici devono corrispondere componenti acustici, la rete elettrica equivalente dovrà contenere una rete a scala. In particolare i fori di uscita della spirale, che costituiscono le derivazioni del condotto di uscita, sono caratterizzate dalle sezioni S1, S2, S3, S4, S5 (vedi Fig. 2); a tali aperture corrispondono i rami trasversali della rete a scala che nel circuito elettrico equivalente sono rappresentati ciascuna da una induttanza L_c in serie ad una resistenza R_c (Morse, 1939) i cui valori sono dati rispettivamente da:

$$L_c = \frac{\rho}{D}$$

$$R_c = \frac{\ln \frac{D}{h}}{4S} \sqrt{2\rho\omega\mu}$$

dove D è il diametro dell'apertura, h lo spessore del foro, ω la pulsazione e μ la viscosità del gas.

E' necessario inoltre considerare anche una capacità C_2 (vedi Fig. 3) in parallelo all'induttanza L_1 del tubo di ingresso poiché quest'ultimo vede la marmitta a spirale come se fosse una cavità.

Infine R_6 corrisponde alla resistenza di irradiazione verso l'ambiente esterno in corrispondenza della bocca di uscita.

3. MISURE E PROVE SPERIMENTALI

Al fine di caratterizzare acusticamente il dispositivo acustico, lo stesso è stato installato su un banco di prova e collegato allo scarico di un motore diesel a 6 cilindri di potenza pari a 300 KW. Al variare del numero di giri del motore da 1000 a 2000 giri/min, cui corrisponde una frequenza fondamentale del rumore prodotto compresa tra 50 e 100 Hz, sono stati misurati i livelli di pressione acustica all'ingresso del condotto di scarico e all'uscita del condotto. Le misure all'uscita del condotto sono state valutate ad una distanza dalla bocca di 0,5 m ed ad un angolo di 45 gradi rispetto all'asse del condotto stesso, come previsto dalla norma ISO 5130/82.

4. INDIVIDUAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO

Il circuito equivalente della marmitta può essere ottenuto in due modi: attraverso la sostituzione di ogni elemento acustico con il suo circuito equivalente oppure, a partire dai dati sperimentali, si può approssimare, nel dominio della frequenza, la funzione di rete misurata. Da tale approssimazione, attraverso tecniche utilizzate nella sintesi di reti elettriche (Martinelli, 1971), si può determinare il circuito equivalente imponendo alcuni vincoli di congruità fisica tra tipologia del circuito acustico e tipologia del circuito equivalente. Tali vincoli sono indispensabili se si vuole interpretare il ruolo dei singoli componenti acustici nella prestazione globale del silenziatore.

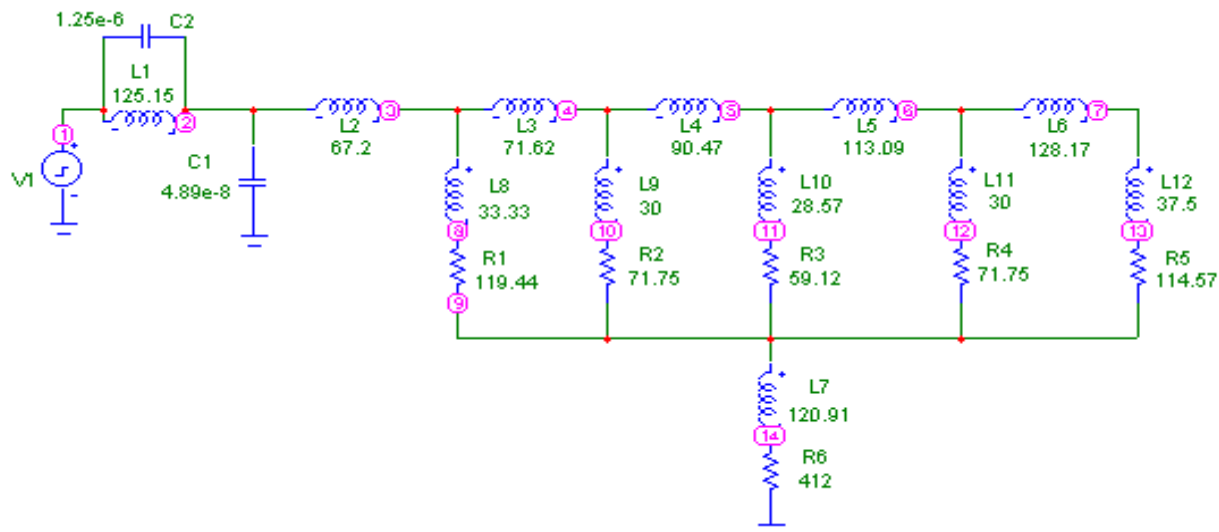


Fig. 3 - Circuito elettrico equivalente della marmitta a spirale

L'applicazione del primo metodo ha condotto al circuito equivalente riportato in Fig. 3. Tale modello è stato implementato in un programma di calcolo, il MicroCAP 6.0, utilizzato per l'analisi dei filtri e delle reti elettriche. Il generatore acustico è rappresentato dal motore il cui circuito equivalente è costituito dalla serie tra un generatore in corrente continua (il flusso dei gas di scarico) ed un generatore di corrente alternata (il rumore) con spettro di potenza compresa tra 50 e 500 Hz oltre ad una propria impedenza interna.

Ai fini dell'attenuazione del rumore è stata considerata solo la componente alternata ed in particolare la forma d'onda che si è assunta approssimare l'andamento della pressione acustica del generatore è un'onda quadra con fronti di salita tali da approssimare lo spettro acustico misurato.

La simulazione è stata condotta, quindi, inserendo in ingresso al circuito equivalente l'onda quadra di cui sopra di ampiezza picco-picco pari a 20kPa. Al variare della frequenza a step di 10 Hz all'interno dell'intervallo di interesse, è stata valutata la pressione acustica al nodo 14, corrispondente al foro di uscita della marmitta.

Al fine di comparare i risultati teorici e sperimentali, i valori della pressione acustica al nodo 14 sono stati utilizzati in un ulteriore modello per stimare la pressione acustica a 0,5 m dalla bocca in direzione 45 gradi rispetto all'asse del condotto di uscita. Si è ipotizzata una propagazione di tipo sferica del campo sonoro con fattore di direttività Q , a 45 gradi, pari a uno. In tal modo si è potuto stimare il livello di pressione sonora nello stesso punto in cui sono state effettuate le misure. Il livello di pressione ponderato con la curva A è stato comparato con i dati sperimentali; il risultato riportato in Fig. 4 mostra un ottimo accordo tra valori teorici e valori misurati.

Nelle Figure 5 e 6 sono riportati, per completezza, gli andamenti temporali della pressione acustica per le frequenze di 50 Hz e 100 Hz (si nota come, dopo un breve transitorio iniziale, l'uscita si stabilizza e, all'aumentare della frequenza, diminuisce il valore efficace della pressione, che si porta da un livello di 126.75 dB a 50 Hz ad uno di 123.52 dB a 100 Hz).

5. OTTIMIZZAZIONE DELLA MARMITTA

Per migliorare il comportamento della marmitta si deve cercare di attenuare la pressione acustica al nodo 14 per le frequenze oltre i 130 Hz, cercando di migliorare le prestazioni del filtro passa-basso corrispondente alla funzione di trasferimento della marmitta analizzata (vedi Fig. 7).

Ciò si può ottenere in vari modi:

- incrementando la capacità C1 ma questo comporta maggiori ingombri e peso del dispositivo;
- aumentando la lunghezza e diminuendo il diametro dei condotti di ingresso e di uscita ma questo comporta un incremento delle perdite di carico;
- diminuendo la sezione della spirale ma anche in questo caso si ha un incremento delle perdite di carico;

– variando tra loro le sezioni dei fori di uscita S1, S2, S3, S4, S5 in modo da mantenere lo stesso valore globale. Poiché in quest'ultimo caso non si hanno particolari svantaggi, è sicuramente questa una delle strade da seguire nella ottimizzazione del silenziatore.

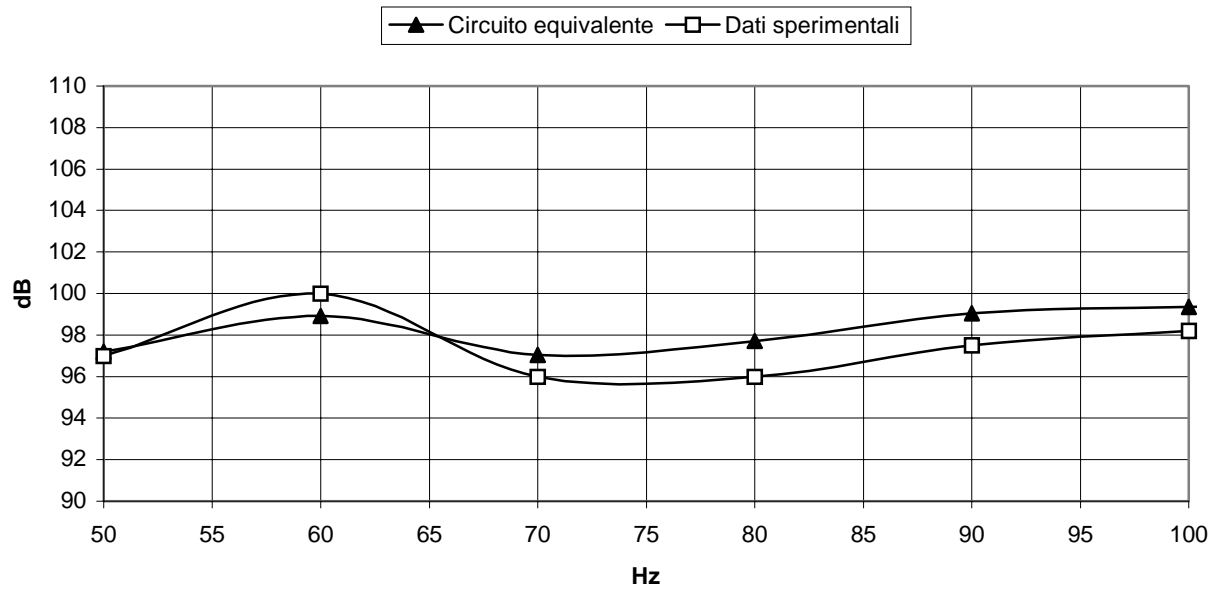


Fig. 4 – Confronto tra i dati sperimentali e i risultati ottenuti dal circuito elettrico equivalente

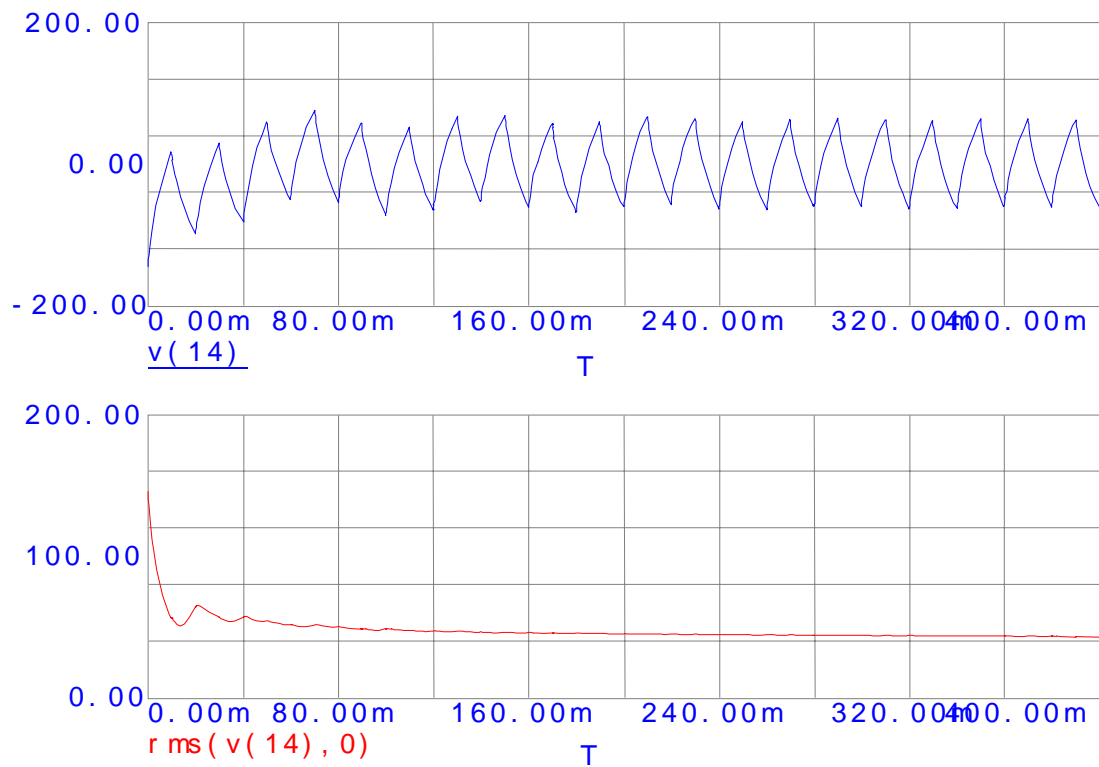


Fig. 5 – Risposta della marmitta a spirale a 50 Hz

Utilizzando il modello sono stati individuati nuovi valori delle aperture: dai valori iniziali $S1=0.01011 \text{ m}^2$; $S2=0.01248 \text{ m}^2$; $S3=0.01376 \text{ m}^2$; $S4=0.01248 \text{ m}^2$; $S5=0.00800 \text{ m}^2$, si è passati a $S1=0.00007 \text{ m}^2$; $S2=0.00012 \text{ m}^2$; $S3=0.00064 \text{ m}^2$; $S4=0.00600 \text{ m}^2$; $S5=0.05000 \text{ m}^2$. La nuova risposta del circuito è quella riportata in Fig. 8. Da tale figura si evince che il livello di rumore in uscita è diminuito di circa 3 dB.

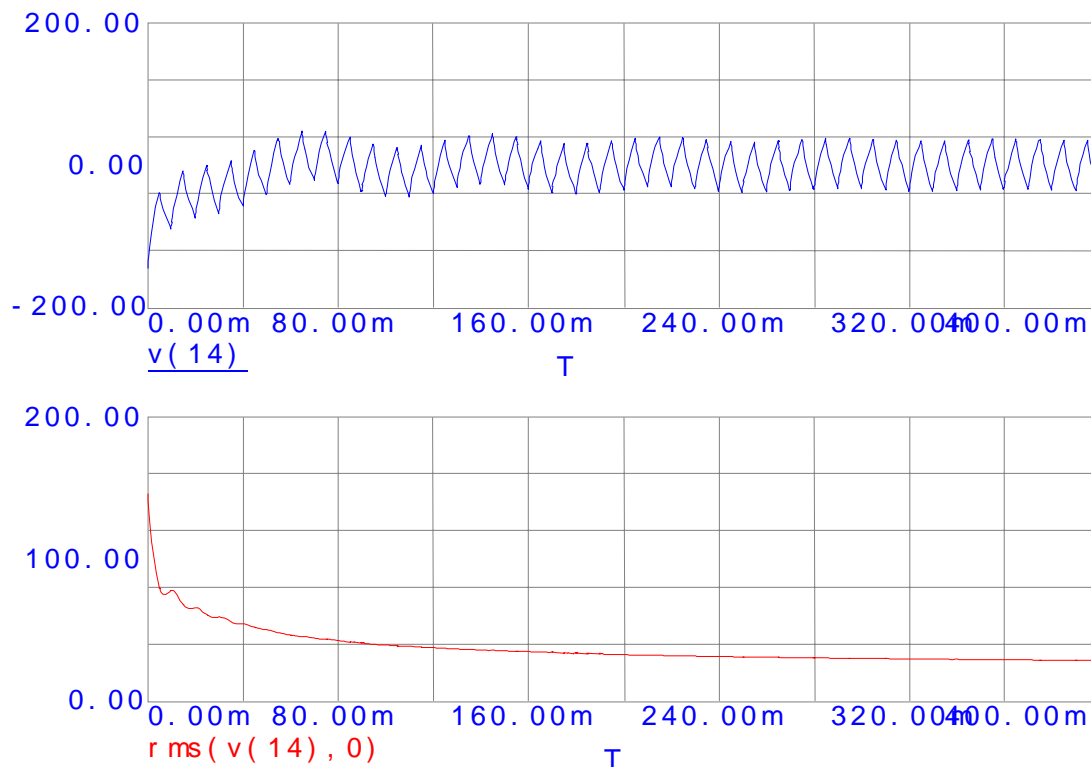


Fig. 6 - Risposta della marmitta a spirale a 100 Hz

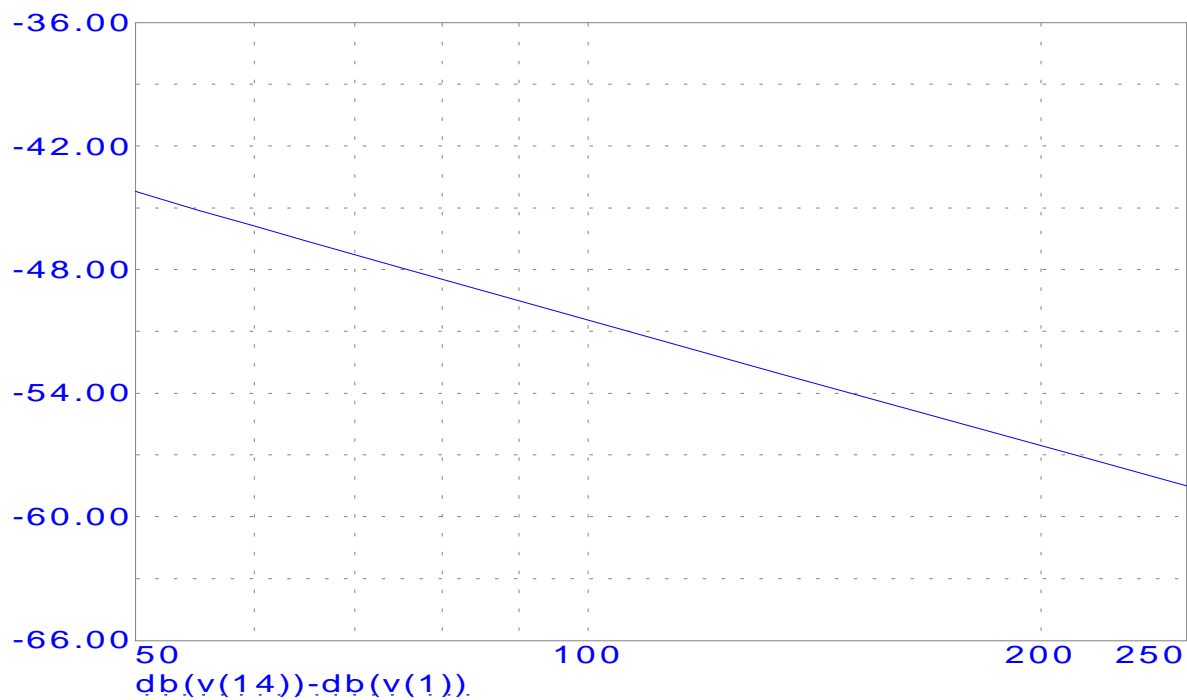


Fig. 7 - Risposta in frequenza della marmitta a spirale originale

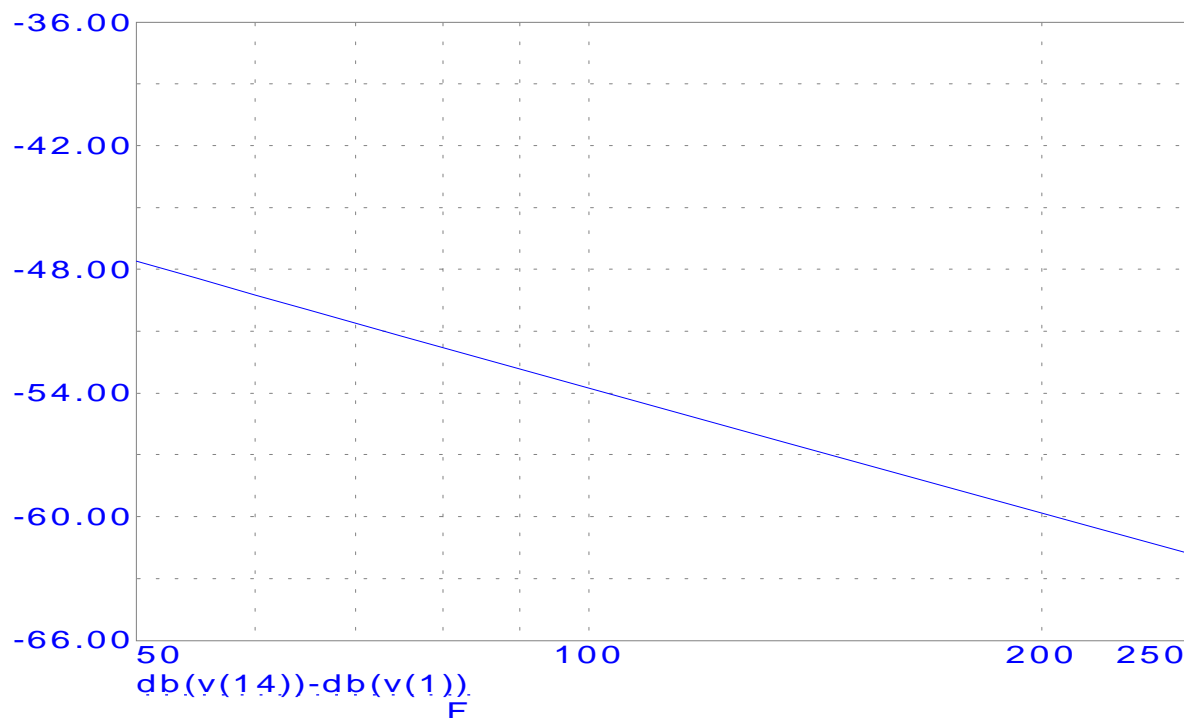


Fig. 8 – Risposta in frequenza della marmitta a spirale ottimizzata

6. CONCLUSIONI

Una nuova marmitta per motori a combustione interna di tipo alternativo è stata studiata dal punto di vista teorico e sperimentale.

Il nuovo dispositivo è basato su un elemento spiraliforme che rispetto alle tradizionali marmitte consente:

- a parità di perdite di carico una riduzione degli ingombri;
- prestazioni acustiche paragonabili o superiori;
- costi (stimati) di realizzazione relativamente bassi;
- durata (stimata) superiore.

Il modello della marmitta è stato ottenuto applicando al circuito acustico equivalente le analogie elettriche delle reti a costanti concentrate.

I risultati ottenuti dal modello risultano in buon accordo con i dati sperimentali. Il modello della marmitta ha consentito di individuare alcuni elementi acustici che sono stati ottimizzati senza alterare le perdite di carico o gli ingombri del silenziatore.

Bibliografia

- P. M. Morse. Transmission of sound in Pipes. J. Acoust. Soc. Am. 11, 205-210. 1939.
- D. Davis et al., Theoretical and experimental investigation of Muffles with comment on Engine Exhaust Design. NACA Report 1192. 1954.
- M. Munjal. Acoustics of Ducts and Mufflers. Wiley NY, 1987.
- P. M. Morse, K. Uno Ingard. Theoretical Acoustics Cap.9. Princeton University Press and McGraw-Hill, 1986.
- A. G. Galitsis, I. L. Ver, Passive silencers and lined ducts. Noise and Vibration Control Engineering. Ed. L. L. Beranek and I. L. Ver, John Wiley & Sons, 1992.
- Cotana et al. An active noise control device for electric power plants. Proceedings of Active 97. Budapest, 1997.
- G. Martinelli, Sintesi delle reti elettriche, Ed. Siderea, 1971.
- Legge quadro sull'inquinamento acustico n. 447. 26 Ottobre 1995.