

## DA UN SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE FEEDFORWARD A UNO FEEDBACK: CONFRONTO SU UN TRATTORE IN ASSENZA DI MOTO

Francesco Mori (1), Andrea Santoni (1), Agnese Marcazzani (1), Patrizio Fausti (1), Francesco Pompoli (1), Christian Preti (2), Pietro Nataletti (3), Paolo Bonfiglio (4)

1) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, francesco.mori@unife.it

2) CNR - STEMS, Torino, christian.preti@stems.cnr.it

3) INAIL, Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro, Roma, p.nataletti@inail.it

4) Materiacustica s.r.l., Ferrara, paolo.bonfiglio@materiacustica.it

### SOMMARIO

Questo studio valuta la prestazione di un sistema di controllo attivo del rumore (ANC) per ridurre l'esposizione al rumore di un guidatore di trattore. Il sistema implementa l'algoritmo filtrato-X ai minimi quadrati (FXLMS) in due configurazioni: feedforward e feedback. Il confronto tra queste due configurazioni è stato fatto in assenza di moto, variando il numero di giri del motore. I risultati mostrano che il sistema feedback si presta maggiormente come soluzione per questo tipo di problema.

### 1. Introduzione

Il rumore percepito all'interno della cabina di un trattore è tipicamente dominato da componenti armoniche a bassa frequenza, generate dal motore e trasmesse principalmente per via strutturale dalle parti meccaniche all'interno della cabina. L'esposizione prolungata a questo rumore può essere causa di disagio per il guidatore. A causa dei vincoli di spazio all'interno della cabina, l'uso di soluzioni passive risulta complicato e spesso non attuabile. In questo caso, il controllo attivo del rumore (ANC) si presta come una soluzione moderna e alternativa per attenuare il rumore indesiderato all'interno della cabina. In precedenti studi [1, 2], tale tecnologia è stata applicata in condizioni statiche e di guida per ridurre l'esposizione del guidatore al rumore. Tale sistema era stato sviluppato in configurazione feedforward (FF) multi-canale così strutturata: un sensore di riferimento esterno alla cabina che rileva un segnale di riferimento della sorgente di disturbo, due microfoni di errore in prossimità delle orecchie del guidatore e due altoparlanti di controllo in cabina. Da questa analisi era emerso che la scelta del sensore di riferimento è un fattore determinante per le prestazioni del sistema ANC. In questa nuova fase del progetto BRIC INAIL 2022 ID-11, è stata valutata la prestazione di un sistema feedback (FB) multi-canale [3], in cui i segnali di riferimento non vengono più rilevati da un sensore, ma vengono modellati internamente dall'algoritmo di controllo, partendo dall'acquisizione dei segnali di errore in prossimità delle orecchie dell'operatore. Le prestazioni di tale sistema sono state valutate in assenza di moto, variando il numero di giri del motore. I risultati in termini di attenuazione sono stati confrontati con quelli ottenuti con un sistema feedforward, considerando diversi segnali di riferimento. Inoltre, per il sistema feedback è stata valutata anche l'effetto sulla loudness, per avere un'indicazione sulla percezione soggettiva. La sezione 2 descrive il setup sperimentale utilizzato, l'algoritmo implementato e le modalità di test per la validazione del sistema. La sezione 3 presenta i risultati di questa analisi in termini di attenuazione e di variazione di loudness. Infine, la sezione 4 riporta le conclusioni di questa nuova fase di sviluppo e i possibili miglioramenti futuri.

### 2. Setup sperimentale e configurazioni ANC

I test sono stati condotti su un trattore Fiat F140 con motore a 6 cilindri e quattro tempi in dotazione presso il CNR-

STEMS di Torino. Tali test sono stati eseguiti in assenza di moto per diverso numero di giri (rpm) del motore. Il setup sperimentale installato all'interno della cabina per la realizzazione del sistema ANC è riportato in figura 1. Due altoparlanti di controllo sono stati installati su un supporto rigidamente fissato alla cabina, alle spalle del guidatore. Due microfoni di errore, che identificano la regione di spazio dove si vuol creare la zona di quiete, sono stati invece installati su un supporto montato sul sedile, in modo tale che possano essere posizionati in prossimità delle orecchie del guidatore. Inoltre, per il sistema feedforward sono stati considerati (uno alla volta) diversi sensori di riferimento: un accelerometro sull'idroguida, uno sul motore e un microfono esterno alla cabina. L'intero sistema ANC è pilotato da una scheda NI cRIO 9063 con FPGA integrata che lavora a 6400 Hz.

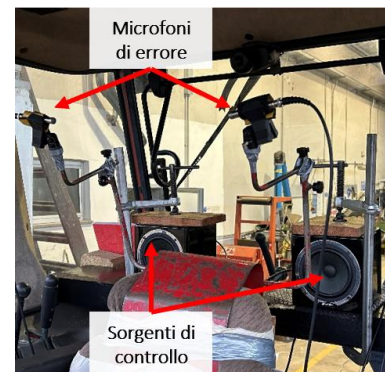


Figura 1 – Setup sperimentale interno alla cabina.

L'algoritmo implementato nel sistema è il classico filtrato-X ai minimi quadrati (FXLMS) con stima preliminare dei percorsi secondari. Il funzionamento di tale algoritmo per il caso di sistema feedforward è riportato in [3]. Il sistema in versione feedback non sfrutta un sensore di riferimento, ma calcola un segnale di riferimento  $x_i(n)$  per l' $i$ -esimo segnale di errore  $e_i(n)$  tramite la seguente espressione:

$$(1) \quad x_i(n) = e_i(n) - \sum_{j=1}^2 s'_{ji} * y_j(n)$$

dove  $y_j$  rappresenta il segnale di uscita dalla sorgente di controllo  $j$ -esima,  $s'_{ji}$  è il filtro stimato preliminarmente, che indica il percorso secondario dalla  $j$ -esima sorgente di controllo all' $i$ -

esimo microfono di errore, e \* rappresenta la convoluzione. Il segnale di riferimento viene modellato istante per istante e processato dall'algoritmo FXLMS allo stesso modo del sistema feedforward. I segnali rilevati dai microfoni di errore sono filtrati con un filtro passa-basso a 600 Hz, per limitare potenziali effetti di instabilità alle alte frequenze. Questo tipo di sistema non può lavorare su rumori non prevedibili, a causa della modellazione interna basata su segnali acquisiti. Tuttavia, per questo tipo di problema, dove il rumore in cabina è dominato da componenti armoniche, può mostrare buone prestazioni.

### 3. Risultati

#### 3.1 Attenuazioni

La figura 2 mostra i risultati in termini di livello globale senza e con sistema ANC acceso. Per i risultati feedforward è stato riportato il miglior risultato ottenuto tra i diversi sensori di riferimento considerati, tipicamente microfono esterno. In generale si può notare che il sistema feedback fornisce la prestazione migliore, con un'attenuazione compresa tra 6 dB e 18.9 dB in tutti i test eseguiti (0 dB – 5.6 dB per il sistema feedforward). Questo risultato si è tradotto in un'attenuazione tra 2.1 dB(A) e 5.7 dB(A), rispetto a -0.8 dB(A) – 8.8 dB(A) del sistema feedforward. L'unica situazione in cui il sistema feedforward ha una prestazione in dB(A) migliore di quella del sistema feedback (e ha portato a 8.8 dB(A) di attenuazione) è quando viene considerato l'accelerometro sull'idroguida come riferimento a 2000 rpm, dove la componente armonica associata all'idroguida è molto rilevante.

In figura 3 viene riportato a titolo di esempio lo spettro in terzi di ottava a 1650 rpm senza e con ANC nelle due configurazioni analizzate (per il sistema feedforward è riportato il caso con microfono esterno). Come si può notare, il sistema feedforward fatica ad agire al di sotto di 80 Hz rispetto al sistema feedback. In questo caso, il rischio per il sistema feedback è quello di saturazione dell'altoparlante per la domanda di potenza a bassa frequenza, ad esempio per la cancellazione della componente a 40 Hz. L'effetto del sistema feedback è analizzato con maggior dettaglio in figura 4 in termini di FFT. A differenza del sistema feedforward, che lavora sulle componenti dotate di elevata coerenza tra il sensore di riferimento e il microfono in cabina, il sistema feedback riesce a modellare e lavorare sulla maggioranza delle componenti armoniche nel campo di frequenza di interesse.

#### 3.2 Effetto sulla loudness

L'effetto del controllo attivo è stato analizzato anche in termini di loudness, parametro psicoacustico che descrive la percezione soggettiva dell'intensità sonora. I risultati (valutati secondo la norma ISO 532-1) sono riportati in figura 5 al variare del numero di giri del motore. Si nota che all'aumentare degli rpm, aumenta la loudness rilevata in cabina senza controllo attivo. Tuttavia, allo stesso tempo, il sistema ANC è in grado di generare una maggiore attenuazione di questo parametro arrivando fino a 9 sones di attenuazione.

### 4. Conclusioni

I risultati mostrano che per ridurre l'esposizione al rumore del guidatore di un trattore, il sistema feedback si presta meglio rispetto al sistema feedforward come soluzione per la cancellazione delle componenti tonali che caratterizzano il rumore in cabina. Inoltre, l'assenza di un sensore di riferimento esterno riduce i costi del sistema. Nei prossimi sviluppi questo sistema

verrà validato con test in moto in diverse condizioni di guida e l'algoritmo verrà migliorato rendendolo più automatico.

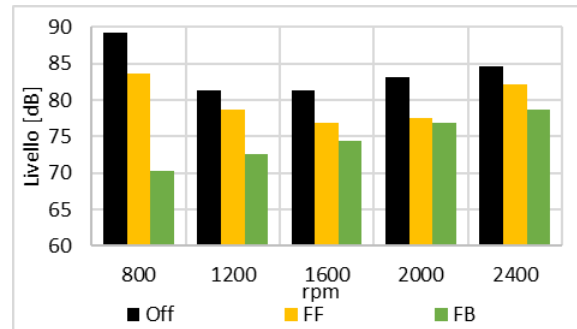


Figura 2 – Livello globale senza e con ANC al variare de numero di giri.

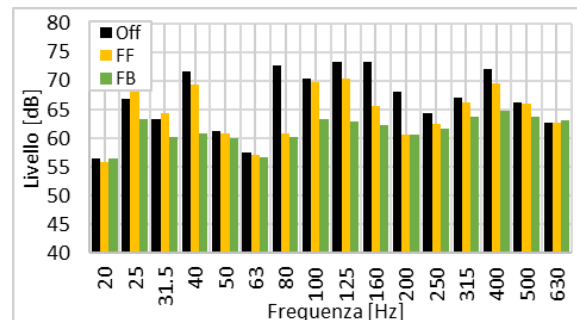


Figura 3 – Livello in terzi di ottava senza e con ANC a 1650 rpm.

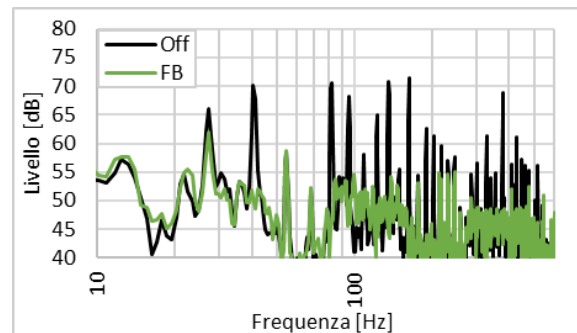


Figura 4 – Livello in FFT senza e con ANC a 1650 rpm.

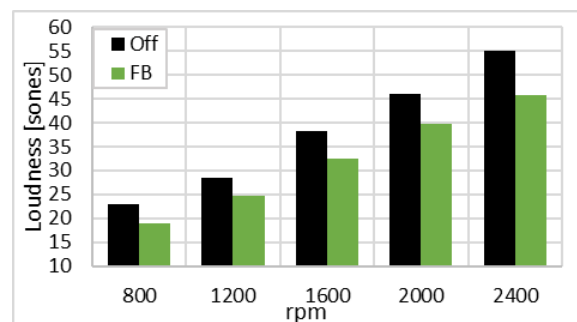


Figura 5 – Loudness senza e con ANC al variare del numero di giri.

### 5. Bibliografia

- [1] Mori F., Santoni A., Fausti P., Pompoli F., Bonfiglio P., *Experimental tests of a multichannel active noise control system for the cancellation of engine noise applied to the cabin of a tractor*, in Atti di ICSV28, Singapore, 24-28 Luglio 2022.
- [2] Mori F., Santoni A., Fausti P., Pompoli F., Preti C., Bonfiglio P., *Active noise control with FXLMS algorithm applied to a tractor in driving condition*, in Atti di ICSV29, Praga, 9-13 Luglio 2023.
- [3] Mori F., Santoni A., Fausti P., Pompoli F., Bonfiglio P., Nataletti P., *The effectiveness of least mean squared-based adaptive algorithms for active noise control system in a small confined space*, Applied Sciences, **2023** (13), 11173.