

BRiC INAIL 2022 ID-11: Sviluppo e sperimentazione di prototipi avanzati di dispositivi per il controllo del rumore e delle vibrazioni a tutela della salute dei lavoratori

Francesco Mori^{a*} | Andrea Santoni^a | Patrizio Fausti^a | Francesco Pompoli^a |
Paolo Bonfiglio^b | Francesco Marafini^c | Annalisa Fregolent^c | Lindoro del Duca^c |
Nicola Stampone^d | Jacopo Brunetti^d | Walter d'Ambrogio^d | Michele Gabrio Antonelli^d |
Christian Preti^e | Antonio Moschetto^f | Diego Annesi^f | Raffaele Mariconte^f |
Pietro Nataletti^f

^a Dipartimento di Ingegneria,
Università degli studi di Ferrara,
Via Saragat, 1, 44122 Ferrara

^b Materiacustica Srl,
Via C. Ravera, 15/A, 44122 Ferrara

^c Dipartimento di Ingegneria meccanica
e aerospaziale,
Università degli Studi di Roma La Sapienza,
Via Eudossiana, 18, 00184 Roma

^d Dipartimento di Ingegneria Industriale
e dell'Informazione e di Economia,
Università degli Studi dell'Aquila,
Piazzale Ernesto Pontieri, 1, 67100 L'Aquila

^e Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia
e la Mobilità Sostenibili del Consiglio
Nazionale delle Ricerche – STIMS CNR,
Strada delle Cacce, 73, 10135 Torino

^f Istituto Nazionale per l'Assicurazione
contro gli Infortuni sul Lavoro,
Via di Fontana Candida, 1, 00078 Roma

* Autore di riferimento:
francesco.mori@unife.it

Ricevuto: 29/9/2025

Accettato: 1/10/2025

DOI: 10.3280/ria2-2025oa21459

ISSN: 2385-2615

L'obiettivo del progetto BRIC 2022 ID-11, finanziato da INAIL, è quello di sviluppare e sperimentare, in laboratorio e in campo, nuove tecnologie per ridurre l'esposizione al rumore e alle vibrazioni di operatori alla guida dei mezzi agricoli e in contesti industriali. I dispositivi sviluppati sono sistemi di controllo attivo del rumore (ANC) e delle vibrazioni (AVC). Queste tecnologie sfruttano degli attuatori per generare in tempo reale delle onde in controfase rispetto a un segnale esistente, eliminandolo per il principio di interferenza distruttiva.

Parole chiave: controllo attivo del rumore, controllo attivo delle vibrazioni, esposizione del lavoratore, macchine agricole, ambienti industriali

BRiC INAIL 2022 ID-11: Development and testing of advanced demonstrators and prototypes of noise and vibration control devices to protect worker health

The aim of the BRIC 2022 ID-11 project, funded by INAIL, is to develop and test in both laboratory and field settings new technologies to reduce the exposure to noise and vibrations of operators driving agricultural machinery and working in industrial environments. The devices developed are active noise control (ANC) and active vibration control (AVC) systems. These technologies use actuators to generate, in real time, counter-phase waves with respect to an existing signal, canceling it out through the principle of destructive interference.

Keywords: active noise control, active vibration control, worker exposure, agricultural machines, industrial environments

1 | Introduzione

I progetti BRIC sono dei progetti di ricerca finanziati da INAIL e finalizzati alla tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. In questo contesto, il progetto BRIC 2022 ID-11 ha lo scopo di sviluppare e sperimentare, in laboratorio e in campo, nuove tecnologie per ridurre l'esposizione al rumore e alle vibrazioni di operatori alla guida dei mezzi agricoli e in contesti industriali. Queste tecnologie sfruttano degli attuatori per generare in tempo reale delle onde in controfase rispetto a un segnale esistente, eliminandolo per il principio di interferenza distruttiva. Il progetto è costituito dai 4 obiettivi specifici di seguito elencati, due legati allo sviluppo di sistemi di controllo attivo del rumore (ANC), e due legati allo sviluppo di sistemi di controllo attivo delle vibrazioni (AVC):

- Obiettivo 1: Controllo attivo del rumore all'interno della cabina di un mezzo agricolo.

- Obiettivo 2: Controllo attivo del rumore irradiato da un cabinato industriale.
- Obiettivo 3: Controllo delle vibrazioni verticali trasmesse agli operatori di mezzi agricoli e industriali.
- Obiettivo 4: Controllo delle vibrazioni sul piano trasversale trasmesse agli operatori di mezzi agricoli e industriali.

A questo progetto hanno partecipato 4 Unità Operative: Dipartimento di Ingegneria meccanica e aerospaziale (DIMA) dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza, il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia (DIIE) dell'Università degli Studi dell'Aquila, il Dipartimento di Ingegneria (DE) dell'Università degli studi di Ferrara e l'Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia e la Mobilità Sostenibili (CNR-STIMS) della sede secondaria di Torino. A queste, si aggiunge il Dipartimento di Medicina, Epidemiologia, Igiene del Lavoro e Ambientale (DiMEILA) come Unità operativa interna di INAIL. Inoltre, questo progetto ha visto la collaborazione

con alcune aziende quali Carraro SpA, Phononic Vibes Srl e COBO SpA, per la definizione dei casi studio su cui sviluppare l'applicazione di sistemi di controllo attivo.

2 | Background

Le malattie professionali correlate a rumore e vibrazioni costituiscono una quota rilevante tra quelle riconosciute da INAIL. Per garantire la tutela dei lavoratori e rispettare i limiti fissati dal D.lgs. 81/2008, vengono adottate soluzioni di prevenzione basate su tecniche passive (fonoassorbimento, fonoisolamento, isolamento e smorzamento delle vibrazioni). Tuttavia, tali strategie risultano poco efficaci soprattutto alle basse frequenze, rendendo necessario l'impiego di tecnologie di controllo attivo: Active Noise Control (ANC) per il rumore e Active Vibration Control (AVC) per le vibrazioni.

Il sistema ANC è particolarmente indicato per ridurre il rumore a medio-basse frequenze. Si basa sulla generazione in tempo reale di un segnale opposto in fase rispetto a un disturbo esistente. L'impiego di algoritmi adattivi consente di adeguarsi a variazioni della sorgente di rumore, superando i limiti delle soluzioni tradizionali che operano su frequenze fisse. Una possibile applicazione riguarda i trattori agricoli, dove il guidatore è esposto per molte ore a componenti di rumore tra 20 Hz e 1000 Hz, principalmente correlate al motore. Altri ambiti di rilievo sono i cabinati industriali, dove il sistema ANC può essere applicato al controllo vibro-acustico della radiazione di pannelli a bassa frequenza, a sistemi di aerazione e alla radiazione attraverso aperture.

Il controllo attivo delle vibrazioni (AVC) trova applicazione soprattutto alle basse frequenze, dove le soluzioni passive risultano meno performanti. Tali sistemi prevedono l'impiego di attuatori capaci di regolare le oscillazioni a cui è sottoposto un oggetto. Nei trattori agricoli, privi di sospensioni posteriori, la trasmissione delle vibrazioni lungo la colonna vertebrale del conducente avviene principalmente attraverso il sedile. Le soluzioni a questo problema variano dalle sospensioni passive (a elementi elastici e smorzanti) a quelle semiattive (ad esempio con sistemi multichamber o smorzatori magnetoreologici), fino a quelle attive, dotate di sensori e unità di controllo che guidano gli attuatori.

In conclusione, l'adozione di tecnologie ANC e AVC rappresenta una prospettiva concreta per ridurre il rischio di esposizione professionale a rumore e vibrazioni. Tali sistemi, applicati sia nel settore agricolo sia in quello industriale, consentono di proteggere la salute degli operatori, sia attenuando il rumore percepito, sia riducendo le vibrazioni trasmesse al corpo.

3 | Obiettivo 1 – Controllo attivo del rumore per la cabina di un trattore

L'Obiettivo 1 del progetto BRIC 2022 ID-11 ha riguardato lo sviluppo e la validazione sperimentale di un sistema ANC applicato alla cabina di un trattore.

Il sistema è stato inizialmente sviluppato, ottimizzato e validato in diversi laboratori, caratterizzati da un differente tempo di riverbero, per verificare le prestazioni in diverse condizioni ambientali. In particolare, i test condotti sulla cabina di un trattore in camera semi-anecoica (Fig. 1) con una sorgente acustica come fonte di rumore hanno permesso di studiare preliminarmente una configurazione da implementare in sito [1,2]. A questo scopo, con supporto di simulazioni numeriche [3,4], sono stati sviluppati diversi algoritmi basati sul metodo ai minimi quadrati (LMS) che potessero tenere conto della variabilità della sorgente di rumore e che potessero contrastare al meglio la potenziale instabilità del sistema. L'analisi preliminare in laboratorio ha fornito alcune indicazioni sulla scelta del sistema ANC da applicare a un trattore reale. In particolare, si è scelto di portare alla validazione in sito un sistema feedback, cioè privo di un sensore di riferimento, in quanto i segnali di riferimento vengono modellati internamente dal sistema in tempo reale. All'interno dell'algoritmo, lo step-size, il parametro che regola la velocità di convergenza del sistema e la sua stabilità, viene normalizzato rispetto alla potenza del segnale di riferimento per tenere conto della variabilità della sorgente. Inoltre, l'introduzione di un limite al voltaggio da poter erogare agli altoparlanti di controllo, di un fattore di leakage per evitare la saturazione degli altoparlanti e l'impiego di filtri digitali per la selezione del campo di frequenze di interesse hanno permesso la realizzazione di un sistema robusto.

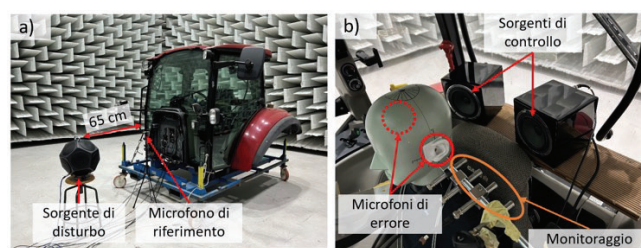


Fig. 1 – Setup sperimentale per lo sviluppo preliminare sulla cabina di un trattore in camera semi-anecoica

Experimental setup for the preliminary development on a tractor cabin in a hemi-anechoic chamber

Le prove su un trattore reale possono essere suddivise in tre categorie:

- prove su trattore fermo, al variare del numero di giri (rpm) del motore;
- prove su trattore in moto, sia su pista asfaltata sia su sterrato, in diverse condizioni di guida;
- prove su trattore in condizioni di lavorazione.

Le prove su trattore fermo hanno riguardato diversi trattori: un mezzo fornito da Agritalia, un trattore Fiat F140 e un trattore New Holland T6020. A titolo di esempio, in Fig. 2 si riporta il setup sperimentale montato sul trattore Fiat F140 [5]. Esso consiste in due microfoni di errore, posti in prossimità della testa dell'operatore e due altoparlanti di controllo posizionati dietro il sedile, all'altezza delle spalle. I segnali acquisiti dai microfoni vengono processati in tempo reale da

una scheda NI-cRio 9063. L'output dell'algoritmo viene utilizzato per generare il segnale in controfase con gli altoparlanti di controllo. In Fig. 3 vengono riportate le attenuazioni globali registrate per diverso numero di giri. In generale, è stato garantito un minimo di 5 dB e 2 dB(A) di attenuazione in tutte le prove condotte con valori massimi fino a 22 dB e 6 dB(A). Tali attenuazioni sono correlabili alla cancellazione delle componenti tonali a bassa frequenza emesse dal motore e percepite dal guidatore all'interno della cabina per via della propagazione strutturale.

Le prove in diverse condizioni di guida sono state condotte presso il CNR-STEMS di Torino [6-8], su una pista asfaltata ad anello di lunghezza 1 km (Fig. 4). Sempre nello stesso sito, alcune misure sono state condotte su un tratto di strada sterrata che porta alla pista. I test sono stati condotti variando il numero di giri del motore e la velocità del trattore. Si riporta a titolo di esempio in Fig. 5 lo spettro in terzi di ottava senza e con ANC e la storia temporale dei principali ordini motore



Fig. 2 – Esempio di setup sperimentale su trattore in sito
Example of experimental setup on a tractor in-situ

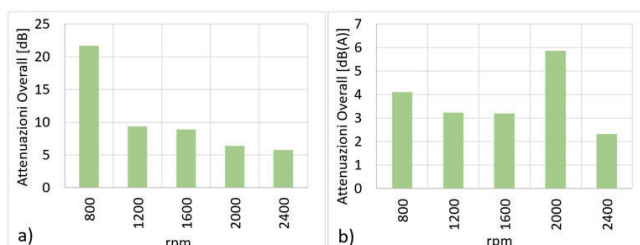


Fig. 3 – Attenuazioni globali registrate a trattore fermo per diversi rpm: a) in dB e b) in dB(A)

Overall attenuation recorded on a motionless tractor for different rpm: a) in dB, b) in dB(A)



Fig. 4 – Contesti delle prove con trattore in condizioni di guida: a) pista asfaltata, b) strada sterrata
Testing contexts for tractor under driving conditions: a) asphalt track, b) unpaved road

(ANC acceso dopo 10 s) per trattore a 1600 rpm e velocità 12 km/h. In generale, si sono ottenute attenuazioni globali fino a 5 dB e 7 dB(A), con qualche raro caso di amplificazione del livello lineare, associato a basse frequenze (< 40 Hz). Risultati simili sono stati ottenuti nelle prove su strada sterrata.

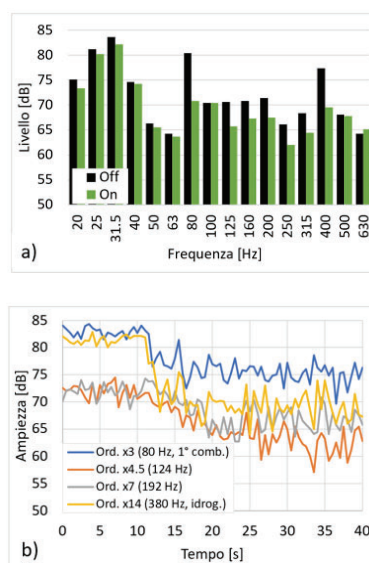


Fig. 5 – Risultati per trattore in moto a 1600 rpm, 12 km/h: a) livello in terzi di ottava senza e con ANC, b) storia temporale del livello dei principali ordini motore

Results for the tractor in motion at 1600 rpm, 12 km/h: a) third octave band level without and with ANC, b) time history of main engine order levels

Infine, per avere una validazione completa, alcune prove sono state effettuate su un trattore New Holland T6020 durante l'aratura di un campo presso Cossignano (AP) (Fig. 6). Anche in questo caso sono state effettuate misure al variare della velocità del trattore. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 7 lo spettrogramma di una misura condotta con motore a circa 1500 rpm, dove sono stati indicati i tratti di storia temporale senza e con controllo attivo. In generale il sistema si è rivelato in grado di agire su diverse componenti del motore, con attenuazioni globali tra 0.7 e 7 dB e fino a 5 dB(A). Inoltre, un'analisi sui principali parametri psicoacustici ha permesso di stabilire che il sistema ANC è in grado di attenuare la loudness, indicatore della rumorosità percepita in cabina, fino a 7 sones.



Fig. 6 – Trattore in lavorazione usato nelle prove di validazione
Tractor in working condition employed for the validation tests

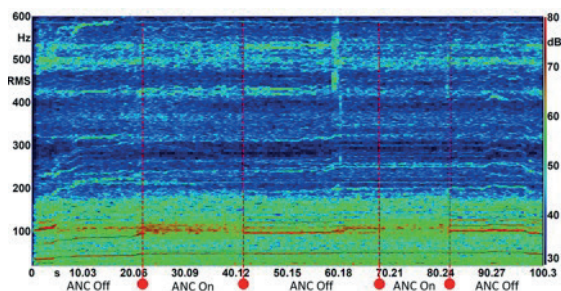


Fig. 7 – Spettrogramma della misura di validazione in condizione di aratura
Spectrogram of the validation test in ploughing condition

Da questi risultati è emersa la potenzialità di integrare il sistema ANC nelle cabine dei trattori al fine di ridurre l'esposizione al rumore del guidatore. Nei possibili futuri sviluppi di questo progetto il sistema potrà essere studiato in ottica di industrializzazione, ricercando il giusto equilibrio tra prestazioni del sistema e costi di realizzazione.

4 | Obiettivo 2 – Controllo attivo del rumore per un cabinato industriale

L'Obiettivo 2 del progetto BRIC 2022 ID-11 è indirizzato a ridurre le emissioni sonore di cabinati industriali con tecniche di controllo attivo, per creare ambienti di lavoro più confortevoli. In tal senso, per eseguire la campagna di misure sperimentali, è stato progettato e fornito da Phononic Vibes srl il cabinato riportato in Fig. 8 che modella in modo rappresentativo l'incapsulaggio di una sorgente industriale [9]. Questo cabinato ha dimensioni interne di 180 × 130 × 140 cm e ha tutte le pareti trattate acusticamente con lana di roccia e rete metallica, ad eccezione di una che può ospitare tre elementi differenti: un pannello con camino, una lamiera non trattata o un'apertura di grandi dimensioni. Queste differenti coperture rappresentano tipiche criticità acustiche per un cabinato industriale, difficilmente trattabili con tecniche passive in particolare a bassa frequenza.

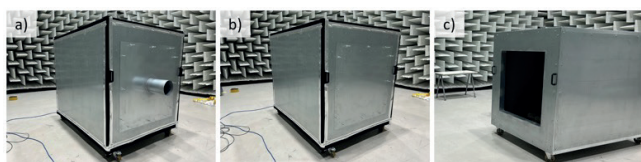


Fig. 8 – Cabinato industriale oggetto dei test: configurazione con a) camino, b) lamiera, c) apertura
Industrial enclosure for tests: configuration with a) chimney, b) steel plate, c) opening

Per il caso con camino è stato sviluppato un sistema ANC feedforward con un solo microfono di errore e un altoparlante di controllo, avendo l'accortezza di rispettare il vincolo di causalità, ossia curando che la distanza tra il microfono di riferimento e quello di errore fosse sufficiente per garantire il processamento e l'emissione dei segnali in tempo reale [10].

Inoltre, essendo il camino una buona guida d'onda, è stato necessario considerare all'interno dell'algoritmo sviluppato la propagazione sonora dalla sorgente di controllo al microfono di riferimento. Le prove sono state condotte sia in presenza di flusso d'aria generato da un ventilatore centrifugo a diverse velocità (Fig. 9a), sia con una sorgente acustica emettente in modo simulato il rumore di diversi macchinari (Fig. 9b). In Fig. 9c viene riportato il setup esterno al cabinato, con la derivazione della sorgente di controllo. Nel caso con ventilatore il rumore è puramente a banda larga, notoriamente difficile da attenuare per il sistema ANC. Si sono registrate attenuazioni globali di 0.6-1.2 dB e 1.4-2.0 dB(A), associate all'attenuazione in diverse bande, principalmente tra 400 Hz e 800 Hz e in quella a 160 Hz. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 10 lo spettro senza e con controllo attivo per velocità di flusso d'aria di 1.75 m/s. Nel caso di registrazioni di macchinari, le attenuazioni variano a seconda del segnale della sorgente di disturbo. In particolare, si sono registrate attenuazioni di 11 – 12 dB(A) per i casi di un trasformatore, di una pompa e di un compressore domestico, caratterizzati da forti componenti tonali stazionarie nel tempo; 3 – 5 dB(A) per compressori industriali, bruciatori a olio e macchine ad acqua, caratterizzati da segnali a banda larga o modulati nel tempo.

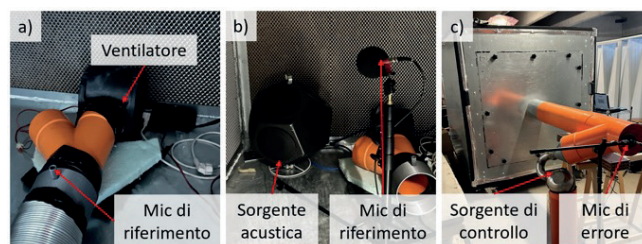


Fig. 9 – Sistema ANC applicato al camino: a) ventilatore come sorgente di rumore, b) dodecaedro come sorgente di rumore, c) setup esterno al cabinato

ANC system applied to the chimney: a) fan as a noise source, b) dodecahedron as a noise source, c) setup external to the enclosure

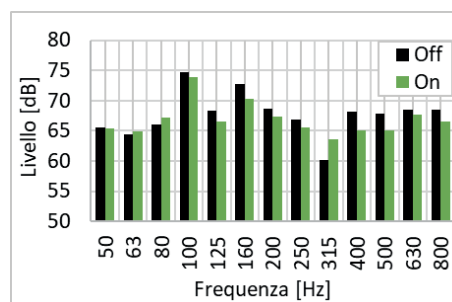


Fig. 10 – Spettro generato dal ventilatore senza e con ANC
Spectrum generated by the fan without and with ANC

Successivamente è stato studiato un sistema di controllo attivo da applicare al caso della radiazione acustica di una piastra in acciaio. Tale sistema prende più correttamente il nome di controllo attivo acustico-strutturale (ASAC) e sfrutta un attuatore inerziale al posto di un altoparlante di controllo

per ridurre il rumore irradiato dall'elemento [11]. Il sistema è riportato in Fig. 11, dove un microfono di riferimento è stato allocato in prossimità della sorgente acustica simulata, mentre la posizione dell'attuatore è stata ottimizzata considerando la rigidità dei bordi e la posizione dei nodi dei modi di vibrare della piastra. Il sistema sfrutta la tecnica dei microfoni remoti (RMT) per definire la zona di quiete: il microfono di errore viene posizionato in prossimità della piastra, ma la cancellazione avviene in posizione virtuale, in questo caso a 60 cm dalla parete del cabinato. Questo permette di non avere ostacoli fisici durante il normale funzionamento del sistema. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 12 lo spettro di un compressore industriale rilevato al microfono di errore senza e con controllo attivo. Il sistema ASAC si è rivelato in grado di ridurre il rumore in tutte le bande dello spettro, con attenuazioni fino a 5.5 dB nella banda a 80 Hz. Le attenuazioni globali sono state di 3.5 dB e 2.9 dB(A), dimostrando la potenzialità del sistema. Simili risultati si sono ottenuti per la lamiera trattata acusticamente come le pareti interne del cabinato.

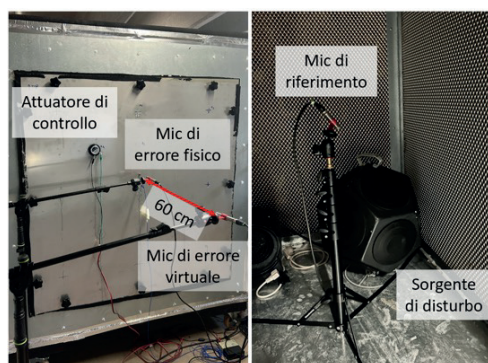


Fig. 11 – Sistema ASAC per il controllo della radiazione acustica di una lamiera

ASAC system for acoustic radiation control of a steel plate

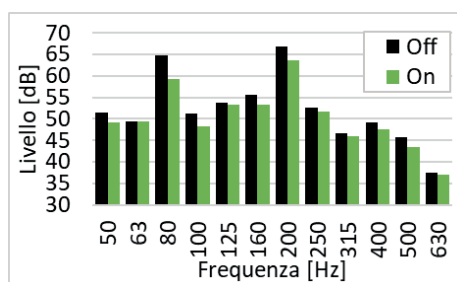


Fig. 12 – Spettro irradiato senza e con ANC per un compressore industriale

Radiated spectrum without and with ANC for an industrial compressor

Infine, il sistema applicato a una grande apertura segue lo stesso principio. Le sorgenti di controllo possono essere posizionate sul contorno dell'apertura, mentre il microfono di errore può essere collocato alla postazione dell'operatore o può essere sfruttata la tecnica RMT per tenere il microfono vicino al cabinato creando la zona di quiete a distanza. I test di validazione per questo caso sono ancora in corso.

Questi studi mostrano la potenzialità della tecnologia di controllo attivo di superare le criticità dell'isolamento fornito dal cabinato, in particolare a basse frequenze, creando ambienti di lavoro più confortevoli.

5 | Obiettivo 3 – Controllo attivo delle vibrazioni verticali su un mezzo agricolo

L'esposizione a vibrazioni a corpo intero (WBV) trasmesse ad un operatore in posizione seduta possono avere effetti negativi sulla salute ed il benessere del lavoratore [12, 13].

Il moto di rotolamento degli pneumatici su terreni sconnessi è una delle principali fonti di vibrazione unitamente all'effetto delle macchine operatrici e del motore termico. Queste vibrazioni si trasmettono attraverso la cabina e il sedile al conducente del mezzo. La norma ISO 2631-1:1997 [14] impone di valutare l'esposizione alle vibrazioni nella banda in frequenza da 0.5 a 80 Hz. Ai fini dell'ottimizzazione di sistemi per il controllo delle vibrazioni verticali, tenendo conto della presenza della sospensione primaria del veicolo e dell'imbottitura della seduta, è ragionevole realizzare un sistema di controllo efficace fino a 10 Hz [15].

I sistemi di controllo delle vibrazioni verticali attualmente in commercio sono tipicamente di tipo passivo o semi attivo [5] e solo in alcuni casi di tipo AVC [16]. Nell'ambito del progetto di ricerca BRIC INAIL ID 11 è stato sviluppato un sistema AVC ad attuazione elettroidraulica [17-19], è stato valutato l'impiego di uno smorzatore a fluido magnetoreologico (MR) in un sistema di controllo semiattivo (SAVC) [20] ed è stato testato un sistema pneumatico SAVC a camere multiple.

5.1 | Sistema AVC elettroidraulico

In Fig. 13 è riportato il sistema AVC ad attuazione elettroidraulica composto da una piastra fissa e da una piastra mobile vincolata a muoversi nella sola direzione verticale da due guide lineari. La velocità relativa tra le due piastre è imposta da un

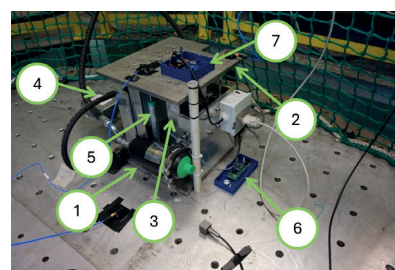


Fig. 13 – Sistema AVC ad attuazione elettroidraulica con (1) piastra fissa, (2) piastra mobile, (3) attuatore idraulico, (4) elettro valvola proporzionale in portata, (5) trasduttore lineare di posizione, (6) accelerometro MEMS di riferimento e (7) accelerometro MEMS di risposta

Electrohydraulic actuated AVC with (1) a fixed plate, (2) a moving plate, (3) the hydraulic actuator, (4) the proportional flow-rate electro valve, (5) the linear position transducer, (6) the reference MEMS accelerometer and (7) the response MEMS accelerometer

attuatore idraulico a doppio effetto alimentato da una elettrovalvola proporzionale in portata. Il segnale di comando dell'elettrovalvola è generato da un controllore che elabora i dati di accelerazione e spostamento relativo per minimizzare l'accelerazione della piastra mobile [21].

Il controllore implementa due algoritmi di controllo simultanei [22]. Un primo algoritmo proporzionale, integrativo e derivativo (PID) è caratterizzato da una costante di tempo dell'ordine dei secondi e agisce sulla posizione relativa tra le due piastre per mantenere lo stelo dell'attuatore in prossimità del centro della sua corsa totale. Un secondo algoritmo FPFxLMS [23, 24] minimizza l'accelerazione della piastra mobile e della massa sospesa in funzione dell'accelerazione della piastra fissa. I due algoritmi di controllo sono stati implementati su una scheda a microcontrollore a basso costo dato il ridotto carico computazionale richiesto per controllare il sistema nella banda in frequenza di interesse.

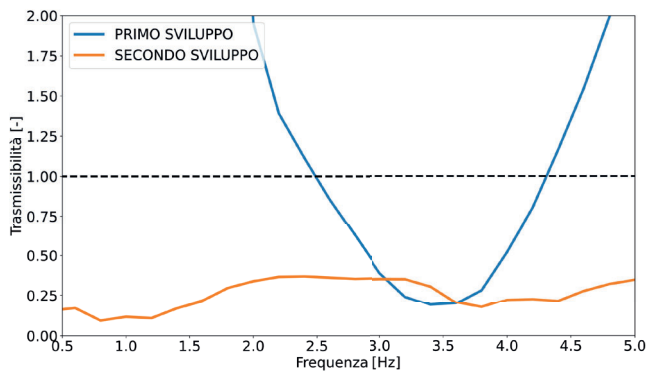


Fig. 14 – Curve di trasmissibilità dei test per il sistema AVC ad attuazione elettroidraulica

Experimental transmissibility curves for the AVC electrohydraulic actuated system

In Fig. 14 sono riportati i grafici di trasmissibilità ottenuti sperimentalmente per due differenti fasi di sviluppo. I test sono stati condotti sfruttando sia la tavola vibrante a 6 GdL del DIMEILA di Monte Porzio Catone che quella del CNR-STEMS di Torino a 1 GdL. In una prima fase il sistema usava accelerometri MEMS analogici. In una seconda fase sono stati usati accelerometri MEMS in protocollo di lettura digitale e sono stati ottimizzati i parametri dell'algoritmo adattivo per migliorarne le prestazioni nella banda di maggiore interesse per le WBV.

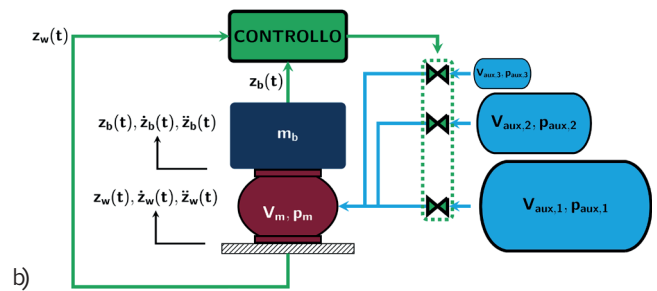
5.2 | Sistema pneumatico SAVC a camere multiple

Il sistema pneumatico SAVC a camere multiple in Fig. 15a presenta come elemento elastico una molla ad aria collegata tra piastra fissa e mobile. Lo schema di principio del sistema è riportato in Fig. 15b. Tre serbatoi sono connessi alla molla ad aria ognuno per mezzo di un'elettrovalvola 2/2. Un controllore implementa un algoritmo di controllo con logica derivata dallo SkyHook. In funzione dello stato del sistema, il controllore

apre una o più elettrovalvole simultaneamente mettendo in comunicazione i volumi ausiliari con la molla ad aria, variando la rigidità della sospensione. In questo modo si modifica il comportamento dinamico del sedile al fine di attenuare le vibrazioni trasmesse alla massa sospesa.



a)



b)

Fig. 15 – Sistema pneumatico SAVC a camere multiple:
a) prototipo e b) schema di funzionamento
SAVC multichamber pneumatic system: a) prototype and b) working scheme

5.3 | Caratterizzazione di uno smorzatore a fluido magnetoreologico

Nell'ambito dei sistemi SAVC sono spesso impiegati smorzatori MR. Un MR è in grado di modificare la forza di smorzamento esercitata in funzione della corrente di alimentazione del dispositivo.

Per valutare l'impiego di un MR in un SAVC il dispositivo è stato caratterizzato sperimentalmente per ricavare un coefficiente di smorzamento strutturale equivalente in funzione della corrente di alimentazione dell'MR. Le prove sperimentali sono state svolte in una macchina di trazione e compressione imponendo una legge di spostamento lineare per ottenere una velocità costante a tratti.

In Fig. 16 sono riportati i risultati dei test di caratterizzazione del MR. Le curve mostrano che a causa dell'effetto di saturazione magnetica, all'aumentare della corrente di alimentazione non corrisponde un aumento significativo della forza di smorzamento esercitata. I risultati sperimentali sono stati approssimati con una legge lineare a tratti funzione della corrente di alimentazione e della velocità dello stelo dello smorzatore. Per ogni valore di corrente di alimentazione del dispositivo è stato identificato un coefficiente di smorzamento strutturale.

Per usare l'MR in un SAVC è possibile considerare logiche di controllo di tipo Sky-Hook che mostrano un'efficacia del dispositivo per l'attenuazione delle accelerazioni sulla massa sospesa. L'algoritmo valuta il prodotto tra la velocità relativa e assoluta della piastra sospesa, in base al quale determina il valore ottimo di smorzamento richiesto a cui corrisponde la corrente di alimentazione per l'MR.

Gli algoritmi di controllo sono stati implementati numericamente confrontando il comportamento del sistema SAVC con un sistema passivo a smorzamento costante. Dall'analisi è emerso che il sistema controllato è in grado di agire sulle accelerazioni verticali della massa sospesa.

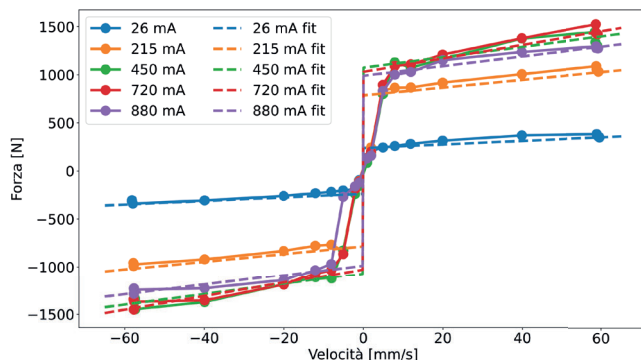


Fig. 16 – Risultati sperimentali di caratterizzazione dell'MR e curve di regressione identificate
Experimental characterization results for the MR and identified fitted curves

6 | Obiettivo 4 – Controllo attivo delle vibrazioni trasversali su un mezzo agricolo

Nelle normali condizioni operative di un veicolo agricolo, gli spostamenti verticali della ruota destra e sinistra dello stesso assale sono differenti. Pertanto, il conducente, oltre che alle vibrazioni nella direzione verticale, è soggetto anche a quelle dovute al moto di rollio.

6.1 | Sistema di controllo attivo delle vibrazioni attorno l'asse di rollio

Per limitare le vibrazioni dovute al moto di rollio si può pensare di collegare la cabina al telaio mediante un meccanismo che permetta alla cabina di ruotare attorno all'asse di rollio del mezzo. È stato sviluppato un dimostratore in scala ridotta di un sistema AVC ad attuazione elettropneumatica rappresentato in Fig. 17a. Il sistema è composto da un telaio superiore, che rappresenta la cabina del mezzo e un telaio inferiore che rappresenta il telaio del mezzo. Il telaio superiore è collegato al telaio inferiore da due bilancieri i cui assi longitudinali convergono in un punto che rappresenta la traccia dell'asse di rotazione del telaio superiore e che deve coincidere con l'asse di rollio del mezzo. Il moto del telaio

inferiore è imposto, pertanto il sistema così definito costituisce un sistema ad un grado di libertà, la cui configurazione può essere controllata da un attuatore pneumatico a doppio effetto interposto tra uno dei bilancieri ed il telaio superiore. L'architettura del sistema consente di compensare con un singolo attuatore sia le rotazioni attorno all'asse di rollio che le oscillazioni laterali indotte dal rollio. Il sistema è dotato di sensori di tipo IMU (Inertial Measurement Units) in grado di fornire accelerazioni, velocità angolari e angoli di assetto e di un traduttore lineare di posizione.

Sono state valutate diverse metodologie per il controllo del sistema. Un primo approccio prevedeva il controllo in pressione di una sola delle due camere dell'attuatore, mediante una elettrovalvola proporzionale in pressione, mantenendo l'altra delle due camere chiusa a formare una molla ad aria. In questo modo era possibile effettuare un controllo di posizione dell'attuatore al fine di compensare l'angolo di assetto del telaio inferiore. Un secondo approccio si basa sull'utilizzo di una valvola proporzionale in portata per controllare i flussi di aria in entrambe le camere dell'attuatore al fine di minimizzare le accelerazioni orizzontali e controllare l'assetto del telaio superiore.

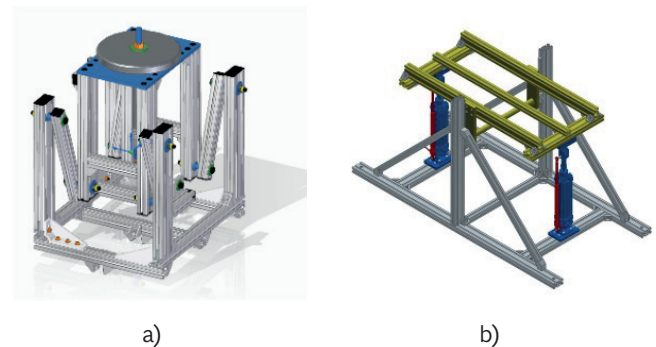


Fig. 17 – Controllo delle vibrazioni attorno l'asse di rollio del veicolo: a) sistema AVC di rollio ad attuazione elettropneumatica e b) piattaforma oscillante a 2 GdL
Control of vibration in the roll direction: a) electropneumatic AVC roll system and b) 2 DoF vibrating platform

6.2 | Sviluppo di un banco prova a 2 GdL per il sistema di controllo delle vibrazioni trasversali

Per poter testare le potenzialità del dimostratore in Fig. 17b è stata realizzata ad hoc una piattaforma vibrante a 2 GdL ad attuazione elettropneumatica [25] da usare in alternativa alla tavola vibrante a 6 GdL. Il sistema in Fig. 17b è composto da un telaio fisso rispetto al quale un telaio mobile è libero di traslare nella direzione verticale e ruotare attorno ad un asse orizzontale. Il moto del telaio mobile è governato da due attuatori pneumatici a doppio effetto controllati rispettivamente da valvole 5/3 proporzionali in portata. Il sistema consente di riprodurre in scala ridotta i profili di spostamento definiti dalla norma ISO 5008:2002 [26].

7 | Conclusioni e prospettive

In questo progetto è stata studiata la potenzialità dei sistemi di controllo attivo del rumore e delle vibrazioni come soluzione per la tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro. In particolare, i risultati sono stati molto incoraggianti e gettano le basi per realizzare applicazioni pratiche e industrializzate. Queste soluzioni possono essere integrate con quelle attuali passive e semi-attive migliorando le condizioni di sicurezza e di comfort degli operatori nei settori agricolo e industriale. Inoltre, tali tecnologie possono essere estese ad altri ambiti simili, quali macchine operatrici, mezzi di trasporto, macchine di movimentazione terra e ambulanze.

Conclusions and perspectives

In this project, the potential of active noise and vibration control systems as solutions for safeguarding health and safety in workplaces was investigated. In particular, the results were highly encouraging and lay the groundwork for the development of practical and industrialized applications. These solutions can be integrated with existing passive and semi-active approaches, thereby improving safety and comfort conditions for operators in the agricultural and industrial sectors. Furthermore, such technologies can be extended to other related fields, such as operating machinery, transport vehicles, earth-moving equipment, and ambulances.



Fig. 18 – Logo dei partners coinvolti
Involved partners logo

Bibliografia

- [1] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, P. Nataletti, The effectiveness of least mean squared-based adaptive algorithms for active noise control system in a small confined space, *Applied Sciences* 13 (2023) 11173. <https://doi.org/10.3390/app132011173>.
- [2] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, L'efficacia di un sistema di controllo attivo del rumore con tecnica dei microfoni remoti nella cabina di un trattore, *Rivista*

Italiana Di Acustica 49 (2025) 9–19. <https://doi.org/10.3280/ria1-2025oa19189>.

- [3] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Active noise control with adaptive algorithms applied to a finite element model, in: 30th International Congress on Sound and Vibration, Amsterdam, 2024.
- [4] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Stima della risposta all'impulso su un modello a elementi finiti mediante analisi nel dominio del tempo con metodi implicito ed esplicito, in: 50° Convegno Nazionale AIA, Taormina, 2024.
- [5] F. Mori, A. Santoni, A. Marcazzani, P. Fausti, F. Pompoli, C. Preti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Da un sistema di controllo attivo del rumore feedforward a uno feedback: confronto su un trattore in assenza di moto, in: 51° Convegno Nazionale AIA, Treviso, 2025.
- [6] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, Prove preliminari di un sistema di controllo attivo del rumore su un trattore in moto, in: 49° Convegno Nazionale AIA, Ferrara, 2023.
- [7] F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, F. Pompoli, P. Bonfiglio, C. Preti, Active noise control with FXLMS algorithm applied to a tractor in driving condition, in: 29th International Congress on Sound and Vibration, Prague, 2023.
- [8] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, C. Preti, P. Nataletti, Active noise control in a tractor cabin: implementation challenges and experimental testing in driving conditions, *Applied Acoustics* 242 (2025) 111087. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111087>.
- [9] C. Marescotti, F. Pompoli, F. Mori, A. Santoni, P. Fausti, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Sistema ANC applicato ad incapsulaggi di macchinari industriali: riduzione del rischio di esposizione al rumore dei lavoratori, in: 50° Convegno Nazionale AIA, Taormina, 2024.
- [10] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Sistema di controllo attivo del rumore applicato al camino di un cabinato industriale, in: 51° Convegno Nazionale AIA, Treviso, n.d.
- [11] F. Mori, A. Santoni, C. Marescotti, P. Fausti, F. Pompoli, P. Nataletti, P. Bonfiglio, Active structural acoustic control with remote microphone technique for noise radiated by a thin plate, in: Forum Acusticum 2025, Malaga, 2025.
- [12] M. Bovenzi, A. Betta, Low-back disorders in agricultural tractor drivers exposed to whole-body vibration and postural stress, *Applied Ergonomics* 25 (1994) 231–241. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0003-6870(94)90004-3).
- [13] S. Kwaku Essien, C. Trask, M. Khan, C. Boden, B. Bath, Association Between Whole-Body Vibration and Low-Back Disorders in Farmers: A Scoping Review, *Journal of Agromedicine* 23 (2018) 105–120. <https://doi.org/10.1080/1059924x.2017.1383333>.
- [14] ISO2631-1:1997, Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration General Requirements., International Organization for Standardization., Geneva, Switzerland, 1997.
- [15] J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, Analysis of the Vibrations of Operators' Seats in Agricultural Machinery Using Dynamic Substructuring, *Applied Sciences* 11 (2021) 4749. <https://doi.org/10.3390/app11114749>.
- [16] Y. Zhao, X. Wang, A Review of Low-Frequency Active Vibration Control of Seat Suspension Systems, *Applied Sciences* 9 (2019) 3326. <https://doi.org/10.3390/app9163326>.
- [17] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, P. Nataletti, Development of a Digital Twin for a Hydraulic, Active

- Seat Suspension System, *Machines* 11 (2023). <https://doi.org/10.3390/machines11070708>.
- [18] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, F. Marafini, Identification of the electromechanical model of a pneumatic positioner for the dynamic actuation of an oscillating platform, in: K.U. Leuven (Ed.), 31st Edition of the Biennial ISMA Conference on Noise and Vibration Engineering - Leuven, Belgium 2024, Leuven, 2024.
- [19] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, F. Latini, Multi-physics modeling of an active seat suspension with pneumatic or hydraulic actuation, *Proceedings of ISMA 2022 - International Conference on Noise and Vibration Engineering and USD 2022 - International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics (2022)* 211–223.
- [20] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, M. Di Manno, A. Fregolent, F. Marafini, Characterization of a magnetoreological damper for semi-active suspension control, in: AIMETA (Ed.), XXVI Congresso AIMETA - Napoli 2024, Naples, 2024.
- [21] A. Moschetto, L. Del Duca, P. Nataletti, F. Marafini, S. Monti, A. Tirabasso, R. Di Giovanni, D. Annesi, A. Fregolent, Prototipo avanzato di sedile con sistema di controllo attivo, *Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale (2025)*.
- [22] F. Marafini, C. Preti, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, G. Paletto, P. Nataletti, Valutazioni delle prestazioni del controllo elettro idraulico delle vibrazioni verticali di un sedile per mezzi agricoli, in: A.I. di Acustica (Ed.), *Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale*, Treviso, 2025.
- [23] F. Yang, Y. Cao, M. Wu, F. Albu, J. Yang, Frequency-Domain Filtered-x LMS Algorithms for Active Noise Control: A Review and New Insights, *Applied Sciences* 8 (2018). <https://doi.org/10.3390/app8112313>.
- [24] F. Marafini, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, L. Del Duca, A. Fregolent, P. Nataletti, Confronto tra algoritmi adattivi per l'identificazione di un sistema di controllo attivo delle vibrazioni, in: A.I. di Acustica (Ed.), *Associazione Italiana Di Acustica - 51° Convegno Nazionale*, Treviso, 2025.
- [25] M.G. Antonelli, J. Brunetti, W. D'Ambrogio, M. Di Manno, A. Fregolent, F. Marafini, Control of a 2 DoFs oscillating platform using pneumatic actuators, in: AIMETA (Ed.), XXVI Congresso AIMETA - Napoli 2024, Naples, 2024.
- [26] ISO5008:2002, Agricultural wheeled tractors and field machinery - Measurement of whole-body vibration of the operator, 2nd ed., International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2002.