



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Controllo attivo del rumore in ambiente esterno: stato dell'arte

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Controllo attivo del rumore in ambiente esterno: stato dell'arte / F. Borchì; M. Carfagni; A. Turchi. -
ELETTRONICO. - (2014), pp. 1-12. (Controllo delle emissioni vibro-acustiche dei prodotti industriali Ferrara
06/02/2014).

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/837303> of the repository was last updated on

Publisher:

AIA

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE IN AMBIENTE ESTERNO: STATO DELL'ARTE

Francesco Borchi, Monica Carfagni, Alessio Turchi

Laboratorio INEA - Dipartimento di Ingegneria Industriale, Firenze

1. Considerazioni preliminari

Le tecniche di controllo attivo stanno oggi diventando sempre più raffinate e hanno raggiunto un livello di maturità sufficiente da essere incluse in dispositivi acustici di avanguardia. Nonostante il grande impegno della ricerca per produrre soluzioni di controllo attivo affidabili, numerosi problemi sono ancora presenti per quanto riguarda l'applicabilità e la stabilità di tali tecniche sia in campo confinato (ambienti chiusi tridimensionali, automotive) che in campo aperto. Proprio in campo aperto sono emersi negli ultimi anni studi estremamente promettenti riguardo alla possibilità integrare le tecniche di controllo attivo con sistemi tradizionali di attenuazione del rumore quali le barriere. Questi studi mostrano la fattibilità tecnica e teorica di soluzioni attive e mostrano un'efficacia superiore all'utilizzo delle sole tecniche passive in particolare per quanto riguarda il controllo delle emissioni rumorose in bassa frequenza.

Il laboratorio di Ingegneria ElettroAcustica (INEA) dell'Università di Firenze (www.inea-lab.eu) è un laboratorio congiunto fra l'Università di Firenze e quattro tra le principali aziende italiane attive nel settore dell'audio: Powersoft S.r.L., B&C Speakers S.p.A., HP Sound Equipment S.r.L., Audiomatica S.r.L.

Il laboratorio INEA è attivo nel settore del controllo attivo del rumore in ambienti aperti e sono in corso studi su soluzioni attive da applicare come elementi anti-diffrattivi su barriere antirumore.

In questo contributo viene riportata una sintesi dello stato dell'arte delle tecniche di controllo attivo abbinata alle barriere antirumore, presentando i maggiori contributi presenti in letteratura per questo campo specifico di applicazione.

L'interesse principale per le tecniche di Controllo Attivo del Rumore (di seguito ANC, “Active Noise Control”) consiste nel fatto che queste potrebbero fornire risultati in termini di riduzione dei livelli di rumore anche e soprattutto alle frequenze più basse dello spettro udibile, dove solitamente i metodi passivi (materiali fonoassorbenti, barriere, ecc.) sono inefficienti.

Uno dei campi di applicazione più promettenti e in via di sviluppo per le tecniche ANC consiste nello sviluppo di barriere attive antirumore (di seguito indicate con “ANB”, “Active Noise Barrier”), in grado di effettuare un controllo attivo del suono

prodotto per diffrazione dal bordo della barriera stessa. Infatti il principale problema delle barriere passive tradizionali, utilizzate tipicamente per ridurre i livelli di pressione prodotti da infrastrutture ferroviarie, autostradali, aeroportuali o industriali, risiede nel fatto che la loro efficacia risulta ridotta alle basse frequenze (inferiori a 500Hz), dove l'altezza della barriera risulta spesso inferiore o paragonabile alla lunghezza d'onda λ del suono incidente. Le tecniche ANC risultano invece potenzialmente più efficaci proprio alle basse frequenze, di qui l'interesse della ricerca per lo studio di soluzioni integrate ANB costituite da una barriera (per l'attenuazione alle frequenze medio-alte) e da un sistema di sorgenti secondarie (altoparlanti) in grado di effettuare il controllo alle basse frequenze.

Nel seguito di questo articolo si utilizzeranno le seguenti convenzioni: si definisce "sorgente primaria" la fonte del rumore da abbattere, mentre con "sorgente secondaria" si indica il sistema di trasduttori che genera il segnale di controllo per ridurre i livelli sonori nella zona d'ombra della barriera. Solitamente si valuta l'efficacia del sistema attivo in termini di "riduzione aggiuntiva" (di seguito " ΔIL ", "Additional Insertion Loss") dei livelli sonori in un'area estesa o su un ricettore specifico, calcolati rispetto all'equivalente soluzione passiva composta dalla sola barriera con il sistema attivo spento.

Diversi metodi di controllo sono presenti in letteratura per ottenere una riduzione attiva dei livelli di pressione sul ricettore posto dietro una barriera. I primi studi risalgono ai primi anni '90 [1][2], i metodi sviluppati possono essere divisi in due grandi famiglie principali:

- Controllo locale dell'impedenza acustica – Un sensore di pressione è posizionato in prossimità della sorgente secondaria, tipicamente posta sul bordo superiore di una barriera. Il sensore effettua una misura delle caratteristiche dell'onda sonora incidente e la sorgente secondaria, sulla base di tale input, si attiva per minimizzare i livelli di pressione sul sensore. Alle basse frequenze (<500Hz) la vicinanza tra sensore e sorgente secondaria fa sì che le loro posizioni possano essere considerate coincidenti, pertanto l'effetto del controllo è equivalente ad adattare l'impedenza di ingresso del cono dell'altoparlante (come vista dall'onda incidente) in modo da renderla quanto più piccola possibile (teoricamente 0) per uno spettro di frequenze più largo possibile. In questo modo, operando sul bordo superiore di una barriera acustica, si genera l'effetto di "bordo soffice" ("*soft border*"), in grado di ridurre il suono diffratto dal bordo superiore verso il ricettore. Tali sistemi utilizzano tipicamente un singolo sensore per ciascun altoparlante e non richiedono una conoscenza in anticipo delle caratteristiche dell'onda sonora prodotta dalla sorgente di rumore principale. Tipicamente in letteratura gli algoritmi di controllo utilizzati per ottenere l'effetto voluto si basano su meccanismi di feedback tramite l'input filtrato (filtri FIR x-LMS) di uno o più microfoni di controllo. Questo tipo di metodo ha il pregio di essere una soluzione in grado di essere racchiusa in un dispositivo compatto e possibilmente dal costo ridotto, tuttavia soffre di problemi dovuti alla difficoltà computazionale del controllo che richiede risposte adeguate in tempi decisamente brevi (dovuti alla minima distanza sensore-sorgente secondaria), tanto che a livello pratico risulta talvolta di difficile implementazione.
- Controllo non-locale – I sistemi precedenti che effettuano un controllo locale dell'impedenza superficiale del bordo di una barriera, sebbene di semplice implementazione, soffrono di alcune limitazioni, evidenziate nella letteratura, quali

una scarsa efficacia nel campo lontano a distanze di decine di metri dalla barriera stessa. Per ovviare a queste criticità diverse soluzioni sono state proposte, alcune delle quali hanno già raggiunto lo stadio prototipale. Complessivamente si tratta di modificare il sistema di controllo passando da un feedback locale, effettuato in prossimità della sorgente secondaria, ad un'analisi del campo sonoro che utilizzi sensori distribuiti nello spazio intorno alla barriera, possibilmente in configurazione di feed-forward in modo da garantire un controllo più stabile su uno spazio esteso. Tali soluzioni fanno uso di più microfoni, oppure combinano i dati provenienti da una schiera di sensori tramite filtri ad-hoc. Il pregio di questa soluzione consiste nella possibilità di usare algoritmi di controllo più complessi e potenzialmente più efficaci, grazie alla conoscenza del campo sonoro in più punti distribuiti nello spazio. Purtroppo spesso l'implementazione di tali soluzioni richiede costruzioni estese e meno compatte del caso locale, portando potenzialmente ad un aumento dei costi.

Per quanto riguarda la tipologia dei sensori utilizzati, si riscontrano principalmente due tipi di approccio:

- Sensori di pressione (microfoni) – Questi sensori vengono utilizzati per ottenere una misura dei livelli di pressione sonora in uno o più punti dello spazio, in modo da effettuare un controllo limitato a tale parametro. In questo caso gli algoritmi di controllo effettuano tipicamente una minimizzazione dei livelli di pressione sulla posizione di uno o più microfoni di controllo, sia in configurazione locale che remota, tralasciando la componente dovuta alla velocità del campo sonoro. Questo tipo di controllo risulta di facile implementazione ma, stando ai risultati riportati in letteratura, mostra un'efficacia ridotta rispetto ad un controllo che utilizzi i dati di pressione unitamente a quelli di velocità.
- Sensori intensimetrici – Un sensore intensimetrico è in pratica un sistema di sensori in grado di misurare contemporaneamente la velocità e la pressione del campo sonoro in un punto dello spazio. In questo modo si ottiene un dato in grado di alimentare un sistema di altoparlanti che emettono un segnale in grado di minimizzare l'energia del campo sonoro piuttosto che la sola pressione. Questa tecnica consente di ostacolare la propagazione del fronte d'onda sonoro attraverso questi punti, differentemente al sistema precedente che agisce su una sola componente scalare del campo sonoro. L'efficacia di tale controllo risulterebbe superiore, stando ai risultati riportati in letteratura, tuttavia la difficoltà di implementazione risultano maggiori.

2. I primi studi sulle barriere attive

I primi lavori teorici su sistemi di controllo attivo applicati a barriere antirumore risalgono ai primi anni '90. Tra i primi lavori sulle barriere attive ci sono quelli di Ise, Yano e Tachibana [1]. Tale team utilizzò una sorgente secondaria posizionata sul bordo superiore della barriera acustica, controllata da un sensore di misura posizionato vicino alla sorgente primaria e da un sensore di errore, dove avviene la minimizzazione della pressione sonora, posizionato in prossimità della sorgente secondaria sul lato della barriera interessato dal ricettore. Il sistema era controllato da una combinazione di filtri FIR x-LMS, la cui implementazione soffriva tuttavia delle scarse possibilità computazionali disponibili all'epoca. Tale lavoro riuscì a mostrare teoricamente e sperimentalmente come fosse possibile ridurre i livelli sonori in presenza di sorgenti rumorose caratterizzate da una singola frequenza fino a 250Hz, con livelli di ΔIL fino a 4-5 dB in un'area

estesa. Tale soluzione soffriva tuttavia di alcuni problemi strutturali: il sensore di misura doveva essere posizionato vicino alla sorgente primaria, e l'efficacia era relativa a singole frequenze.

Omoto e Fujiwara [2] tentarono un approccio per superare i limiti dovuti alla necessità di un sensore di misura in prossimità della sorgente rumorosa. Le sorgenti secondarie furono posizionate a 0.5 m dal bordo della barriera, in direzione della sorgente primaria, e i sensori di errore furono collocati sul bordo della barriera, in modo da minimizzare i livelli di pressione in prossimità del bordo di diffrazione. Nello specifico, in questa configurazione gli altoparlanti sono controllati da sensori tramite un meccanismo di feedback. Dal momento che è assente un percorso acustico diretto tra sorgente secondaria e ricettore, la loro propagazione verso la zona d'ombra avviene solo tramite diffrazione, così come per la sorgente primaria. Tale lavoro rappresenta una efficace dimostrazione della possibilità di ottenere una riduzione dei livelli di rumore in un'area estesa. In un successivo lavoro sperimentale [3] gli stessi autori testarono il modello teorico in condizioni realistiche su una barriera acustica in campo aperto, dimostrando come per ottenere una buona attenuazione sia necessario utilizzare una linea di altoparlanti posti tra di loro ad una distanza inferiore alla metà della lunghezza d'onda incidente. Sebbene i risultati ottenuti con sorgenti rumorose dallo spettro contenuto in una sola banda di ottava (centro banda 125 Hz) abbiano mostrato risultati notevoli (6 dB di riduzione aggiuntiva a 50 m dietro la barriera), i test effettuati con sorgenti con emissione in banda larga mostrano risultati molto più modesti. Gli stessi autori fanno notare come oltre alla problematicità generata da sorgenti ad ampio spettro di emissione, i problemi principali ancora da risolvere siano quello atmosferico (influenza del vento e delle condizioni atmosferiche sul sistema di controllo) e quello dovuto a sorgenti in movimento.

Un articolo successivo di Guoa e Pan [4] del 1998, basato sulla stessa configurazione utilizzata da Omoto e Fujiwara analizza gli effetti dovuti alle riflessioni del suolo, riscontrando una forte riduzione dei valori di ΔIL (fino al 50% a 2 m dalla barriera) in presenza di suolo riflettente sul lato della sorgente di rumore.

In seguito a questi primi lavori i filoni di ricerca si sono concentrati anche nel superare gli ostacoli fisico-tecnici che ostacolano la realizzazione di dispositivi efficaci. Le principali criticità consistono nella difficoltà di costruire dispositivi compatti, poco costosi ed efficienti, e nell'ideare sistemi di controllo e algoritmi in grado di garantire un effetto stabile e su uno spettro di frequenze più ampio, nonché rispetto a sorgenti in movimento.

3. Sistemi basati sul controllo locale dell'impedenza acustica del bordo di diffrazione di una barriera

I lavori successivi abbandonano la configurazione di Omoto e Fujiwara e si concentrano sul posizionamento delle sorgenti secondarie direttamente sul bordo superiore della barriera, in modo da fornire una soluzione più pratica e di maggiore efficacia. Infatti, il problema delle riflessioni evidenziato nella soluzione di Omoto e Fujiwara, principalmente dovuto a problemi di multipath con diverse fasi incidenti sui microfoni di controllo, non viene riscontrato nella nuova configurazione con sorgenti secondarie montate sul bordo della barriera.

Il primo prototipo realistico di elemento antidiffrattivo attivo per barriere antirumore è stato sviluppato da Ohnishi et. al. [5] nel 1999 (figura 1).

L'idea fondamentale consiste in una serie di altoparlanti controllati ciascuno da un microfono posizionato in prossimità della superficie del cono e disposti in quattro file su una base cilindrica riempita di materiale fonoassorbente in analogia con gli elementi antidiffrattivi passivi già in uso (coprendo una sezione di 180° rivolta verso il lato esterno della barriera), pertanto di facile installazione sul bordo superiore di una barriera esistente. In tale configurazione il dispositivo funziona effettuando un controllo locale, ovvero minimizzando i livelli di pressione in prossimità del bordo del cilindro. Tale prototipo vantava un range di funzionamento dai 160 ai 630 Hz, con un livello medio di ΔIL superiore di 2-5 dB rispetto ad un equivalente cilindro antidiffrattivo passivo.

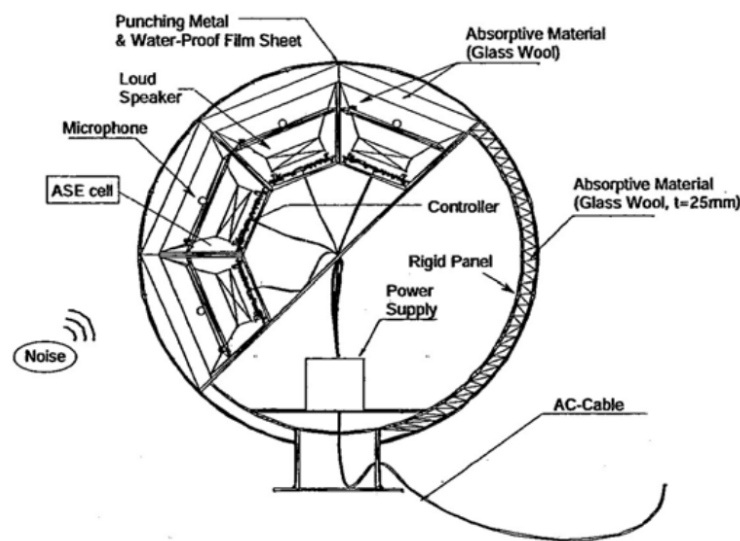


Figura 1 – Prototipo di elemento attivo cilindrico per ANB.
Riproduzione di figura 8 da [5].

In un successivo lavoro del 2004 [6] (figura 2) gli stessi autori riportano il test di un secondo prototipo avanzato, evoluzione della loro idea originale, effettuato su una barriera in condizioni reali e rumore tipico del traffico stradale ad ampio spettro.

Questo secondo prototipo avanzato, che ancora oggi costituisce lo stato dell'arte per quanto riguarda i sistemi antififfattivi attivi “*soft-edge*”, abbandona la forma cilindrica e diminuisce il numero di altoparlanti necessari per il controllo, seppur mantenendo inalterato il principio di funzionamento. In questo caso si tratta di un elemento a T formato da due file di altoparlanti con sensore in prossimità del cono disposti ai lati del bordo superiore della barriera antirumore, sulla quale viene montato l'elemento stesso.

Usando come test una sorgente statica di rumore di tipo stradale, con frequenze nel range 315-1000 Hz, gli autori riportano un'efficacia superiore in termini di ΔIL rispetto al solo elemento a T utilizzato in modo passivo. Nello specifico viene riportata una ΔIL addizionale media, su un'area fino a 10m dalla barriera di altezza 5m, di 4.6 dB in caso di asfalto riflettente e di 3.9 dB in caso di asfalto poroso fonoassorbente. In questo caso, come evidenziato precedentemente, si nota come la configurazione utilizzata con sorgenti secondarie in prossimità del bordo di diffrazione mostri un comportamento rispetto alle riflessioni opposto rispetto a quella di Omoto e Fujiwara, che invece soffriva di grandi perdite di efficienza in presenza di suolo riflettente.

L'effetto misurato da Ohnishi et al. riporta valori di ΔIL relativi a distanze dalla barriera fino a 10 m e un'efficacia decrescente all'aumentare della distanza.

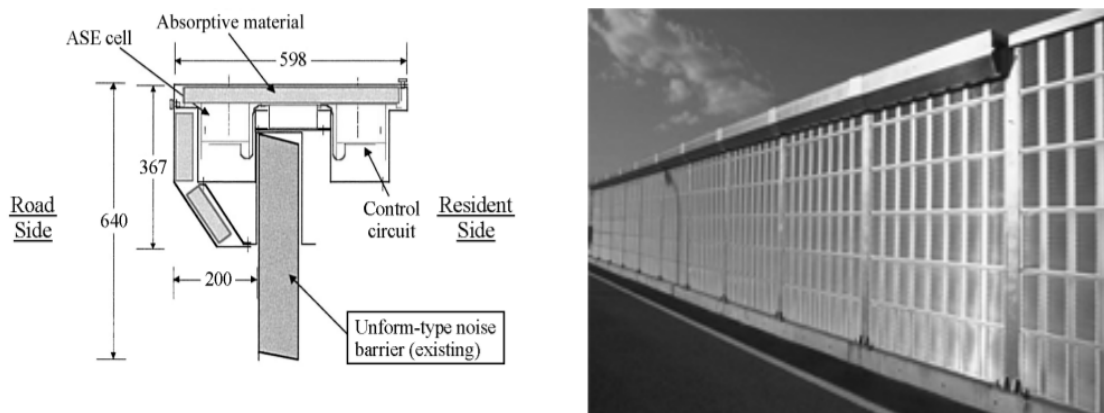


Figura 2 – Prototipo di elemento attivo a “T” per ANB.
Riproduzione di figura 2 e 3 da [6].

Uno studio di Nakashima e Ise presentato sempre nel 2004 [7] (figura 3) tenta di estendere l'idea precedente aggiungendo altri altoparlanti sui lati della barriera e modificandone la geometria. Il lavoro consiste in una pura analisi numerica tramite simulazioni al computer: prendendo spunto dal prototipo di Ohnishi, tre file di altoparlanti vengono posizionate sul bordo superiore di una barriera di 3 m di altezza (la prima affacciata verso la sorgente di rumore, la seconda verso il ricettore e la terza direttamente sopra il bordo della barriera e rivolta verso l'alto, come nello schema in figura 3, tipo 2). Ciascun altoparlante effettua un controllo di feedback di tipo locale con un sensore posizionato a 25 mm dal bordo del cono e il sistema è configurato in modo da garantire una riduzione di almeno 20 dB dei livelli di pressione sul microfono stesso.

La configurazione precedente costituisce il sistema prototipo di test. La sorgente di rumore simula lo spettro tipico del traffico stradale e la configurazione viene testata posizionando la sorgente a 3 o 6 m di distanza dalla barriera, in modo da valutare l'efficacia in più situazioni.

Questo lavoro, sebbene puramente numerico, mette in luce diversi effetti fondamentali. Per prima cosa si nota come il posizionamento a 6 m della sorgente di rumore provochi un calo di efficacia nel controllo attivo di circa il 40% rispetto al suo posizionamento più vicino a 3 m, fornendo un'importante indicazione sul posizionamento delle barriere in relazione alle sorgenti di rumore.

Mentre il caso prototipo (figura 3, barriera tipo 2) mostra, dalle simulazioni numeriche, una ΔIL media di circa 3.9 dB su un'area fino a 3 m di altezza e 15 m di distanza dalla barriera, in linea con i risultati di Ohnishi et al., Nakashima e Ise mostrano come l'aggiunta di una quarta fila di altoparlanti, posizionata a circa 1/4 dell'altezza complessiva della barriera, sul lato del ricettore (figura 3, barriera tipo 3), porti ad un importante aumento dell'efficienza del sistema complessivo, fino a 7.6 dB di ΔIL media nella stessa area. Tale effetto tuttavia non viene motivato a sufficienza nell'articolo ed ulteriori studi sarebbero necessari per confermare il beneficio ottenibile con la configurazione proposta.

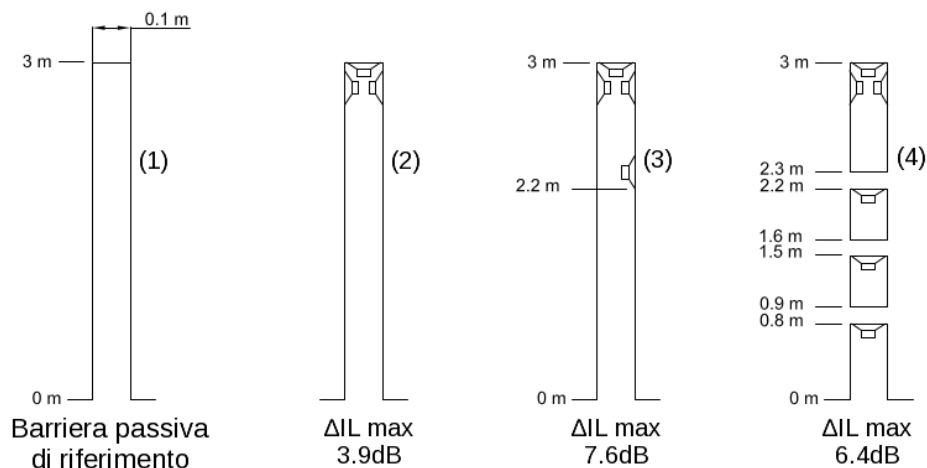


Figura 3 – Schema del posizionamento degli elementi attivi su barriera testati da Nakashima e Ise [7].

L'ultima configurazione testata numericamente da Nakashima e Ise (figura 3, tipo 4) consiste in una barriera con tre fessure orizzontali di 0.1 m, in modo da ridurre l'impatto del vento sulla struttura. Su bordo superiore viene montata la configurazione di riferimento di altoparlanti, mentre altre sorgenti secondarie vengono posizionate ciascuna sul lato inferiore di ogni fessura. Anche tale configurazione risulta estremamente efficiente, con un ΔIL media di 6.6 dB, sebbene di implementazione più complessa, visto il maggior numero di altoparlanti necessari, ma con dei notevoli vantaggi dal punto di vista costruttivo a causa della minor resistenza al vento, principale fattore di limitazione dell'altezza delle barriere passive.

E' possibile trovare una trattazione estesa del fenomeno del bordo acustico soffice (“*acoustic soft edge*”) in un lavoro di Koh e Möser [8]. In tale articolo viene descritto un modello matematico completo per un sistema di controllo attivo di tipo locale a formacilindrica simile a quello utilizzato nel primo prototipo di Ohnishi et. al. [5]. I valori di ΔIL di tale sistema vengono analizzati in diverse configurazioni e in diverse disposizioni delle sorgenti secondarie e dei sensori di feedback sul bordo del cilindro antidiffrattivo. L'analisi viene condotta sia dal punto di vista matematico che numerico, con la riproduzione del campo acustico intorno al bordo del sistema di controllo. Il modello mostra come la presenza di una superficie acusticamente soffice con impedenza nulla (su un cilindro di impedenza teoricamente infinita) sia efficace per la riduzione dell'energia che si propaga tramite diffrazione dal bordo. Attraverso il modello di Koh e Möser è possibile giustificare il beneficio, in termini di ΔIL , osservato nei dispositivi sperimentali precedentemente discussi. Nello stesso lavoro tale modello viene inoltre validato sperimentalmente in camera anecoica confermando i risultati osservati in [5].

4. Evoluzione dei sistemi ANB - controllo non locale

I risultati forniti dai sistemi che implementano un controllo locale dell'impedenza sul bordo superiore della barriera mostrano risultati notevoli in termini di ΔIL , tuttavia soffrono di alcune limitazioni critiche. Da un lato la letteratura evidenzia come i benefici maggiori si ottengano quando la barriera viene posizionata a ridosso della sorgente di rumore, dall'altro i valori di ΔIL mostrano un rapido decremento con l'aumentare della distanza dalla barriera sul lato del ricettore e non risultano confermati nel campo lontano. Tali limitazioni pongono un serio limite ai campi di applicazione delle barriere atti-

ve, richiedendo in sostanza una distanza massima tra ricevitore e sorgente primaria di rumore che non superi i 20 metri.

Alcuni studi hanno tentato di superare le limitazioni precedenti del controllo locale dell'impedenza sviluppando nuove tecniche focalizzate al controllo in campo lontano. La complicazione richiesta da tali tecniche risiede nel fatto che la sovrapposizione in controfase delle onde sonore prodotte dalla sorgente primaria e dalle secondarie non è più necessariamente locale, ma piuttosto centrata su un punto in prossimità di un sensore di errore posto ad una certa distanza dalla sorgente secondaria e dal bordo della barriera.

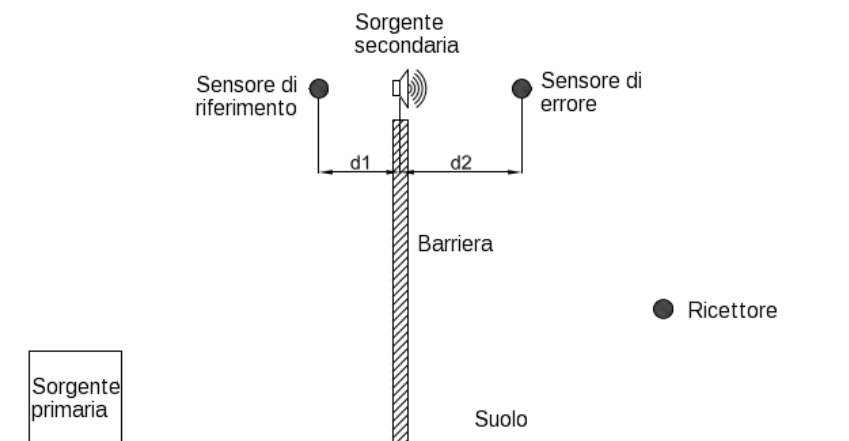


Figura 4 – Schema generico di un modulo di elemento attivo che implementa un controllo di tipo feed-forward tramite un sensore di riferimento e di errore.

Nello specifico risulta fondamentale un lavoro di Berkhoff del 2005 [9], dove si analizza in dettaglio l'efficacia di tecniche di sensori virtuali per il controllo del campo lontano. Il lavoro è puramente teorico e i risultati sono forniti da simulazioni numeriche. La barriera attiva proposta da Berkhoff consiste in una fila di sorgenti secondarie posizionate come di consueto sul bordo superiore di una barriera antirumore passiva. Il controllo implementato è di tipo feed-forward, dove ciascun altoparlante è controllato separatamente da un sensore di riferimento posto a 0.5 m dal bordo della barriera verso la sorgente primaria, mentre un microfono di errore posto 0.5 m dietro la barriera verso il ricevitore fornisce un feedback adattivo per il sistema.

Inoltre, il modello utilizzato prevede di stimare, a partire dalle condizioni ambientali di propagazione (distanza, velocità del vento, ecc.), la funzione di trasferimento tra la sorgente secondaria e il ricevitore posto in campo lontano. In tal modo è possibile definire una serie di sensori “virtuali” posti anche in campo lontano dove avviene l'effettiva minimizzazione dei livelli di pressione. In questo modo viene garantita la prestazione nel campo lontano.

Sebbene tale soluzione sia fortemente dipendente dalla stabilità delle condizioni ambientali che influenzano la funzione di trasferimento, la geometria del sistema accorre in aiuto: la sorgente primaria di rumore agisce sul ricevitore come una sorgente virtuale di diffrazione posta sul bordo della barriera, pertanto sia la sorgente primaria che quelle secondarie risultano ai fini pratici posizionate in prossimità l'una dell'altra, e pertanto hanno un percorso acustico e una funzione di trasferimento simile rispetto al ricevitore in campo lontano. Tale considerazione fa sì che gli eventuali fattori che possono influenza-

re il percorso acustico sul lato del ricevitore agiscano equivalentemente su entrambe le tipologie di sorgenti, rendendo il controllo stabile nella maggior parte delle situazioni.

Nello specifico i test numerici riportati nell'articolo di Berkhoff mostrano un'efficacia in termini di ΔIL fino a 11.6 dB nel campo vicino alla barriera a fino a 10 dB in campo lontano. La presenza di vento fino a 5 m/s in direzione perpendicolare alla barriera riduce l'effetto benefico in campo lontano di 2/4 dB a seconda dell'altezza del ricevitore, ma comunque non annulla l'efficacia della soluzione attiva.

Le performance dei sistemi di barriere attive con feed-forward sono analizzate sperimentalmente in un lavoro di Zou, Lu e Qiu [10], dove vengono comparate le prestazioni dei sistemi adattivi (con parametri di controllo in tempo reale del filtro adattivo) rispetto ai sistemi non-adattivi (con parametri di controllo del filtro fissati). La configurazione utilizzata consiste in una serie di moduli indipendenti formati da una sorgente secondaria posta sul bordo superiore della barriera, un sensore di riferimento posto a 0.1/0.4 m dal bordo della barriera in direzione della sorgente primaria e un sensore di errore posto alla stessa distanza verso il ricevitore. Ciascun input è trattato con un filtro x-LMS ai fini di produrre il segnale di controllo. Tale soluzione risulta costruttivamente simile a quella di Berkhoff [9] sebbene non faccia utilizzo di sensori virtuali.

I risultati numerici mostrano come l'efficacia dei sistemi feed-forward a parametri pre-impostati (ovvero non adattivi) risulti comparabile con le soluzioni precedenti relative al controllo locale di impedenza, tuttavia dai risultati emerge un'efficacia notevole dei sistemi adattivi, con livelli di ΔIL medi (su un'area fino a 10 m dalla barriera) fino a 14.9 dB, a seconda della distanza dei sensori dalla barriera (con risultati migliori per maggiori distanze dei sensori, fino a 0.4 m).

Tali sorprendenti risultati sono solo parzialmente confermati dai test sperimentali in camera anecoica, condotti con sorgenti di toni puri, dove la prestazione in ΔIL dei sistemi adattivi risulta in valori compresi tra 0.2 dB e 6 dB nel range di frequenze tra 200 Hz e 1250 Hz (con un picco di efficacia intorno ai 600 Hz).

Più convincenti risultano i risultati sperimentali di Jung, Kim, Kim e Nam del 2011 [11], che arrivano a costruire un prototipo reale di barriera attiva funzionante tramite un controllo adattivo feed-forward (figura 5) e a testarlo in camera anecoica rispetto a diverse condizioni realistiche di utilizzo. Il dispositivo realizzato consiste in un elemento antidiffrattivo a Y, da montare sul bordo della barriera, sul quale sono posizionati gli elementi attivi ciascuno formato da un altoparlante, un microfono di riferimento posto a monte del trasduttore (verso la sorgente primaria) e un microfono di errore posto a valle, rispetto al percorso acustico della sorgente di rumore. Il sistema di controllo utilizza un filtro x-LMS multi-canale (MFXLMS) che accoppia gli input e gli output provenienti da sensori e altoparlanti per generare i parametri adattivi del filtro e il segnale di controllo.

I test in camera anecoica sono condotti sia con segnale multi-frequenza artificiale, sia con sorgenti di tono puro in movimento (300 Hz, 1 m/s), sia con un compressore ad aria reale. Sebbene non siano disponibili i risultati per il campo lontano, a causa dell'ambiente limitato della camera anecoica, l'efficacia in termini di ΔIL a 2 m dalla barriera della soluzione proposta risultano significativi: sia con sorgente in movimento che con il rumore a banda larga prodotto dal compressore il sistema riesce a garantire fino a 10 dB di ΔIL su tutte le ottave fino a 500 Hz, di gran lunga superiori ai benefici forniti dalle soluzioni prototipali prodotte da Ohnishi et al. [5][6].

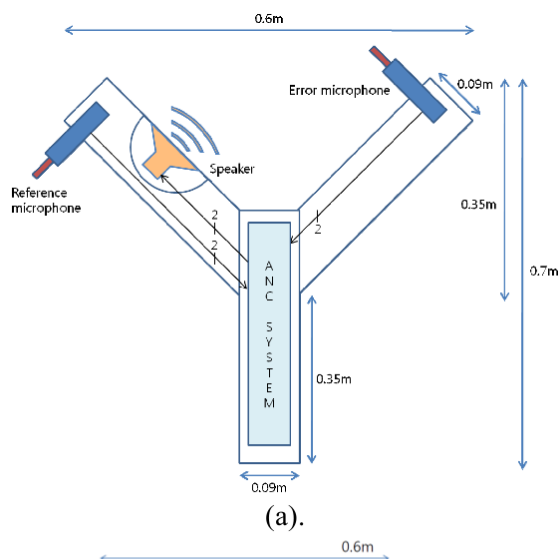


Figura 5 – Schema del prototipo di elemento attivo a “Y” per ANB, che effettua un controllo adattivo di tipo feed-forward. Riproduzione di figura 2a da [11].

Un diverso approccio, sia teorico/numerico che sperimentale (in camera anecoica), viene portato avanti da Han e Qiu [12], dove viene invece utilizzata una configurazione del sistema simile a quella di Omoto e Fujiwara [2]: le sorgenti secondarie sono poste in prossimità della sorgente primaria, mentre una fila di sensori viene posizionata sul bordo della barriera. Differentemente dalle precedenti soluzioni, Han e Qiu utilizzano sensori prodotti da Microflown, la cui novità consiste nella capacità di riunire in un dispositivo compatto un sistema di misura in grado di ottenere contemporaneamente dati sulla pressione e sulla velocità del campo sonoro incidente, ovvero effettuare una misura di intensità sonora. Grazie al dato acquisito Han e Qiu effettuano un controllo che minimizza i livelli di energia acustica in prossimità del bordo della barriera, piuttosto che la semplice pressione sonora. Tale controllo, sebbene di implementazione decisamente più costosa, fa sì che la propagazione dell'energia acustica venga ostacolata in maniera più efficiente, dal momento che la minimizzazione avviene per entrambe le componenti del campo acustico.

Le simulazioni numeriche e i test sperimentali sono condotti su una barriera di 1.22 m di altezza e con una sorgente primaria di rumore a 200 Hz (tono puro).

Nel campo vicino i risultati prodotti dalle simulazioni numeriche mostrano un'efficacia in termini di ΔIL simile alle soluzioni che implementano solo il controllo di pressione, tuttavia a partire da 4 m fino a 20 m e oltre il metodo di minimizzazione dell'energia mostra un'efficacia molto superiore con ΔIL fino a 19 dB. I test sperimentali, sebbene condotti in camera anecoica e su distanze limitate, sembrano confermare la tendenza mostrata in campo lontano nelle simulazioni con risultati fino a 10-12 dB a 6m dalla barriera.

Un ulteriore innovativo sistema di barriera attiva è stato recentemente proposto da Hart e Lau [13] (figura 6), come evoluzione naturale dei sistemi di controllo locale di impedenza. Il sistema è formato da una serie di elementi indipendenti posti parallelamente sul bordo superiore di una barriera passiva. Ciascun elemento è formato da tre altoparlanti posti su un asse lineare ed equispaziati di una distanza prefissata, dipendente dalla frequenza minima di lavoro del dispositivo, come già notato in precedenza da Omoto e Fujiwara [3].

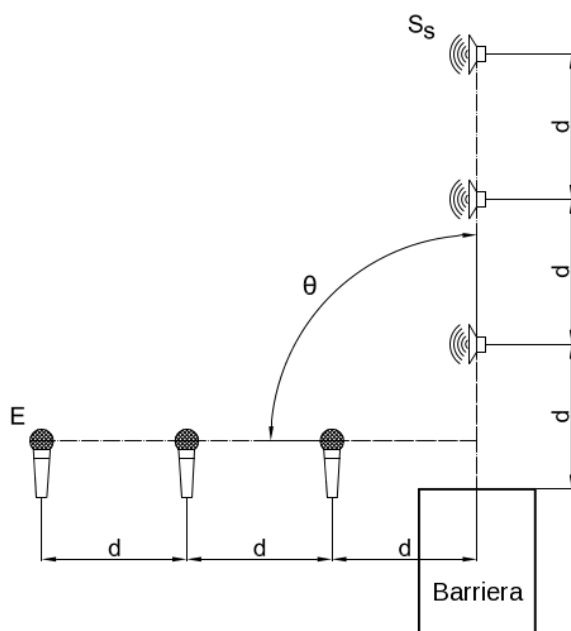


Figura 6 – Schema del dispositivo proposto da prototipo da Hart e Lau in [13], che effettua un controllo del gradiente di pressione di fronte ad una griglia di altoparlanti posizionata sul bordo di una barriera passiva.

Perpendicolarmente a tale asse sono montati tre microfoni disposti in fila ed equispaziati della stessa distanza degli altoparlanti. Tale configurazione consente al sistema di controllo di effettuare una minimizzazione del gradiente di pressione misurato dai tre sensori, piuttosto che del singolo valore scalare dei livelli di pressione su un solo microfono come nelle configurazioni a “bordo soffice” viste in precedenza. In riferimento alla figura 6, l'asse dei microfoni è direzionato verso il lato della barriera che interessa la sorgente di rumore. L'intera configurazione può essere ruotata di un angolo θ rispetto al bordo della barriera. Tale orientamento, come si evince dai risultati numerici illustrati nell'articolo, è il fattore chiave per ottenere un'efficienza massima alle basse frequenze, laddove la distanza tra gli altoparlanti sia inferiore a $1/4$ della lunghezza d'onda dell'onda sonora incidente.

Il sistema è testato attraverso simulazioni numeriche, con differenti configurazioni di altoparlanti/microfoni. Gli autori dell'articolo testano alcune configurazioni di prova: nel caso si utilizzi un solo altoparlante per ciascun elemento (quello più in basso) i risultati in termini di ΔIL in un'area fino a 10 m dietro la barriera mostrano risultati che variano da 10 a 13 dB. Nel caso in cui invece si utilizzino tutti e tre gli altoparlanti i valori di ΔIL raggiungono i 20 dB a 500 Hz.

5. Conclusioni

In questo contributo abbiamo deciso di illustrare l'evoluzione della ricerca sul tema delle barriere antirumore integrate con dispositivi per il controllo attivo, mostrando i lavori più significativi e i contributi più interessanti presenti in letteratura. Questo settore di studi, sebbene relativamente giovane, ha visto negli ultimi anni progressi notevoli e presenta numerose potenzialità per future evoluzioni. Diversi dispositivi hanno già raggiunto lo stadio prototipale, sebbene il loro utilizzo sul campo sia ancora in fase embrionale a causa degli indubbi costi realizzativi rispetto alle soluzioni passive

tradizionali. Negli ultimi anni si sono affacciate diverse idee e nuovi approcci al problema, per cui è auspicabile un futuro interesse da parte del mercato dei costruttori di barriere antirumore qualora una di queste nuove soluzioni si rivelasse competitiva dal punto di vista dell'efficienza, della stabilità e del costo di implementazione.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ente Cassa di Risparmio di Firenze per il finanziamento ricevuto per lo sviluppo della ricerca del laboratorio INEA sul controllo attivo del rumore (nell'ambito del progetto "*Analisi e sviluppo di sistemi elettroacustici ...*", presentato su Bando Ente Cassa di Risparmio di Firenze 2011).

Si ringraziano inoltre i partner industriali del laboratorio (Powersoft S.r.L., B&C Speakers S.p.A., HP Sound Equipment S.r.L., Audiomatica S.r.L) per il prezioso contributo fornito.

6. Bibliografia

- [1] Ise S.; Yano H.; Tachibana H., *Basic study on active noise barrier*, Journal of the Acoustical Society of Japan, 12 n.6 (1991), pp. (299-306).
- [2] Omoto A., Fujiwara, K., *A study of an actively controlled noise barrier*, J. Acoust. Soc. Amer., **94** (1993).
- [3] Omoto A., Takashima K., Fujiwara K., Aoki M., Shimizu Y., *Active suppression of sound diffracted by a barrier: An outdoor experiment*, J. Acoust. Soc. Am., **102** (1997).
- [4] Guoa J., Pan J., *Increasing the insertion loss of noise barriers using an active-control system*, J. Acoust. Soc. Am. **104** (1998).
- [5] Ohnishi K., Teranishi S., Nishimura M., Uesaka K., Hachimine K., Ohnishi H., *Development of the Noise Barrier using Active Controlled Acoustic Soft Edge*, proceedings ACTIVE 99 (1999), pp. (595-606).
- [6] Ohnishi K., Saito T., Teranishi S., Namikawa Y., Mori T., Kimura K., Uesaka K., *Development of the Product-type Active Soft Edge Noise Barrier*, proceedings ICA 2004, pp (1041-1044).
- [7] Nakashima T., Ise S., *Active noise barrier for far field noise reduction*, proceedings ICA 2004, pp (2161-2164).
- [8] H. Koh, Möser M., *Efficiency of Actively Controlled Surface Impedance of Upper Sections Attached to Noise Barriers*, Building Acoustics, **11** (2004), pp (115-131).
- [9] Berkhoff A. P., *Control strategies for active noise barriers using near-field error sensing*, J. Acoust. Soc. Am., **118** (2005), pp. (1469-1479).
- [10] Zou H., Lu J., Qiu X., *The Active Noise Barrier with Decentralized Feedforward Control System*, proceedings of ICSV 17 (2010).
- [11] Jung T.-H., Kim J.-H., Kim K.-J., Nam S.-W., *Active noise reduction system using multi-channel ANC*, proceedings of ICCAS 11 (2011), pp. (36-39).
- [12] Han N., Qiu X., *A study of sound intensity control for active noise barriers*, Applied Acoustics **68** (2007), pp. (1297-1306).
- [13] Hart C. R., Lau S.-K., *Active noise control with linear control source and sensor arrays for a noise barrier*, Journal of Sound and Vibration, **331** (2012), pp. (15-26).