



LA BONIFICA DEL RUMORE MEDIANTE CONTROLLO ATTIVO: STATO DELL'ARTE

Andrea Nicolini

Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

SOMMARIO

Il problema del controllo del rumore negli ambienti di lavoro ha contribuito ormai da diversi anni allo studio ed allo sviluppo, da parte di aziende specializzate, di materiali fonoassorbenti e fonoisolanti passivi. I metodi convenzionali che utilizzano materiali assorbenti hanno tuttavia elevata efficienza per l'abbattimento di rumori con contenuto spettrale in media e alta frequenza ma si rivelano inefficienti alle basse frequenze: lo spessore dei materiali porosi necessario a produrre un elevato assorbimento acustico cresce enormemente al diminuire della frequenza del suono; inoltre, il potere fonoisolante delle pareti diminuisce al diminuire della frequenza. Si intuisce, quindi, come un numero non certamente irrilevante di problemi di rumore sono legati alla presenza di componenti in bassa frequenza proprio per la difficoltà di attenuare tali suoni. In questi ultimi decenni si è sviluppato a tal proposito un filone di attività che si propone di studiare e risolvere questo tipo di problemi attraverso sistemi attivi e che è denominato controllo attivo del rumore. Esso si basa sul principio dell'accoppiamento o interferenza distruttiva tra i campi sonori generati dalla sorgente originale primaria (rumore) e da una sorgente secondaria (antirumore). Nel presente lavoro, a tal proposito, sono descritte le tecniche impiegabili per il controllo attivo del rumore e lo stato dell'arte relativo all'applicazione di tali tecniche alle problematiche di rumore in ambiente di lavoro. Tale metodologia ha avuto sviluppo, anche in combinazione con metodi passivi, in particolare nel controllo del rumore nei condotti, quali quelli di scarico di motori a combustione interna (gruppi elettrogeni), nel controllo del rumore tramite cuffie (DPI) attive e nel controllo del rumore emesso da macchinari mediante tecniche di controllo attivo delle vibrazioni. Questi sembrano i campi in cui è più efficace e conveniente l'impiego di tale tecnica.

1. GENERALITÀ E CENNI STORICI

I pannelli fonoassorbenti passivi sono generalmente costituiti da materiali porosi e/o strutture risonanti, quali risonatori di Helmholtz e pannelli vibranti; tali strutture consentono di attenuare i livelli di rumore presenti in un ambiente o emessi alla sorgente per attrito viscoso o fenomeni di risonanza [1]. I pannelli fonoisolanti

passivi consentono di abbattere le emissioni acustiche prodotte da una sorgente di rumore per l'elevata massa superficiale degli stessi. I metodi convenzionali che utilizzano materiali fonoassorbenti hanno tuttavia elevata efficienza per l'abbattimento di rumori con contenuto spettrale in media e alta frequenza ma si rivelano inefficienti alle basse frequenze: lo spessore dei materiali porosi necessario a produrre un elevato assorbimento acustico cresce in modo inversamente proporzionale con la frequenza del rumore [1]; inoltre, il potere fonoisolante delle pareti diminuisce al diminuire della frequenza del rumore, in base alla legge della massa [1]. Inoltre, il coefficiente di assorbimento dell'aria ambiente è praticamente trascurabile alle basse frequenze, aumenta con la frequenza fino a diventare dell'ordine di 0.01 dB/metro a 2000 Hz [1]; pertanto, diventa significativo per distanze dell'ordine delle centinaia di metri e se ne deve tenere conto nella propagazione del suono all'aperto, mentre, di solito, è trascurabile nel caso degli ambienti chiusi. Si intuisce, per le proprietà suddette, come un numero non certamente irrilevante di problemi di inquinamento acustico è legato alla difficoltà di attenuare le componenti in bassa frequenza del rumore.

In questi ultimi decenni si è sviluppata un'attività di ricerca che si propone di studiare e risolvere questo tipo di problemi attraverso sistemi attivi e che è denominata generalmente controllo attivo del rumore. Essa si basa sul principio dell'accoppiamento o interferenza distruttiva tra i campi sonori generati dalla sorgente primaria (rumore) e da una sorgente secondaria (antirumore). Il termine attivo si riferisce al fatto che una sorgente sonora controllabile è impiegata per produrre un segnale di antirumore che, sommato al campo sonoro indesiderato, dà luogo ad una elevata attenuazione del rumore (vedi **figura 1**).

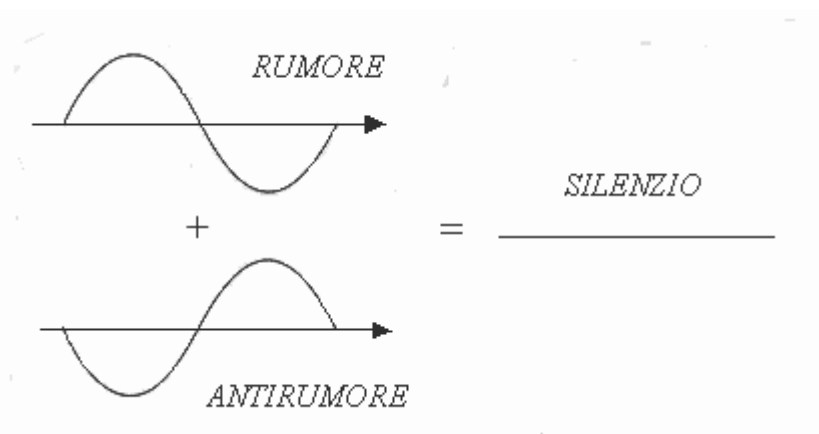


Figura 1: principio del controllo attivo del rumore

Tale metodologia può essere applicata per la riduzione sia del rumore trasmesso per via aerea che di quello trasmesso per via solida (vibrazioni). La sorgente di antirumore può riprodurre segnali acustici in tutto il campo di frequenze corrispondenti all'udibile umano (20-20kHz); la velocità di calcolo dei sistemi esistenti in commercio è tale comunque da rendere i sistemi attivi particolarmente adatti per l'abbattimento delle basse e medie frequenze (inferiori a 500 Hz), per i

quali i sistemi passivi, come precedentemente affermato, presentano forti limitazioni. Tra l'altro, il rumore aereo o generato per via strutturale da diversi macchinari industriali possono presentare elevate componenti a basse frequenze, il cui abbattimento risulta pertanto difficilmente se non impossibile da realizzare mediante metodi passivi. Un sistema ideale di abbattimento di rumore a larga banda (in tutto lo spettro dell'udibile) può essere pertanto costituito dall'integrazione di sistemi attivi con tecniche passive di riduzione del rumore.

L'applicazione base del controllo attivo fu descritta in un manifesto negli USA nel 1936 dal tedesco Paul Lueg. Egli proponeva un sistema antirumore consistente di un microfono che catturava il suono ed un altoparlante opportunamente amplificato e in opposizione di fase con l'onda della sorgente da attenuare:

a) per la situazione semplice di un'onda piana sinusoidale di frequenza f (come per la propagazione di un rumore in un condotto) si regolava la distanza dell'altoparlante dal microfono in modo tale che fosse uguale a mezza lunghezza d'onda o a suoi multipli dispari (vedi **figura 2**);

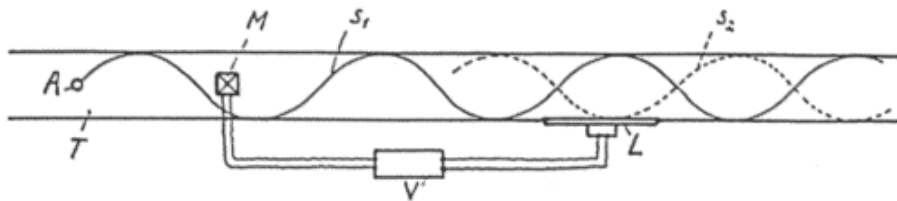


Figura 2: il sistema di P.Lueg per l'attenuazione del suono (disegno originale)

b) per una sorgente in campo aperto il microfono doveva essere alla stessa distanza radiale dell'altoparlante rispetto alla sorgente (che costituiva il centro di emissione) e spaziato sulla circonferenza di mezza lunghezza d'onda. L'attenuazione che si otteneva era limitata alla regione dell'altoparlante;

c) per suoni non sinusoidali Lueg proponeva di catturare il suono nelle vicinanze dell'altoparlante in modo da creare una zona circostante limitata di cancellazione del suono.

Venti anni dopo H. Olson propose un approccio diverso: mentre nel sistema di Lueg il suono catturato dal microfono era generato in direzione dell'altoparlante e quindi il sistema veniva denominato feedforward, cioè per anticipazione, in quello di Olson invece il microfono era posto immediatamente vicino all'altoparlante e alimentava in controreazione l'amplificatore di controllo. Questo secondo metodo è detto sistema feedback ed è meno efficace se i suoni da trattare sono imprevedibili. Per esempio, per rumori a larga banda, le componenti in alta frequenza fanno sì che la forma d'onda cambi rapidamente ed in modo aleatorio prima che la variazione stessa sia trasmessa all'altoparlante. La fase pionieristica del controllo attivo del rumore si concluse con gli studi di William Conover il quale lavorò alla riduzione attiva del rumore acustico dei principali trasformatori conseguendo risultati veramente interessanti. Dopo venti anni di lavoro frenetico sulla ricerca del controllo attivo gli studi pratici si fermarono per riprendere poi con le prime applicazioni di tecniche digitali in questo campo. La ragione principale dello sviluppo dei sistemi digitali

consiste nel fatto che per mantenere il giusto equilibrio richiesto per il controllo feedforward il controllore doveva essere in grado di adattarsi ai cambiamenti ma tale comportamento era difficile da ottenersi con sistemi analogici.

2. TIPOLOGIE PRINCIPALI DI SISTEMI DI CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE

Il principio del controllo attivo del rumore può essere applicato mediante differenti configurazioni, a seconda del volume all'interno del quale è previsto l'abbattimento del rumore.

2.1 CONTROLLO CON ACCOPPIAMENTO ACUSTICO

Tale metodo consiste nel posizionare a breve distanza dalla sorgente primaria una sorgente secondaria che irradia nello stesso volume (vedi **figura 3**); in tal modo, la sorgente di rumore, inizialmente monopolare, diventa bipolare. Un ascoltatore a distanza elevata dalle due sorgenti ne distingue solo una costituita dalla sovrapposizione degli effetti delle due sorgenti suddette. La pressione acustica sulla superficie della sorgente primaria viene ridotta dall'interferenza con quella generata sulla stessa superficie dalla sorgente secondaria. Ciò viene realizzato facendo in modo che la sorgente secondaria abbia la stessa ampiezza della primaria ma si trovi in opposizione di fase ad essa; in tal modo, si avrebbe una cancellazione completa del rumore solo nel caso in cui le due sorgenti si trovassero in posizioni coincidenti. In realtà, non essendo questo un caso realistico, la cancellazione risulta disuniforme nello spazio, ove risultano zone di massimo e di minimo della pressione acustica.

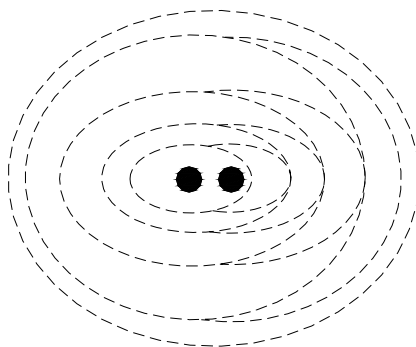


Figura 3: controllo con accoppiamento acustico

2.2 CONTROLLO DEL CAMPO IRRADIATO

Questo metodo consiste nel confinare il campo sonoro all'interno di una superficie chiusa contenente la sorgente primaria, cancellandolo al di fuori di essa. A tale scopo, è necessario disporre una serie di sorgenti secondarie su tale superficie; le sorgenti secondarie vengono controllate autonomamente in modo che la loro

sovrapposizione cancelli il rumore al di fuori della superficie (vedi **figura 4**). L'applicazione di tale tecnica è notevolmente complessa e spesso porta a risultati non soddisfacenti.

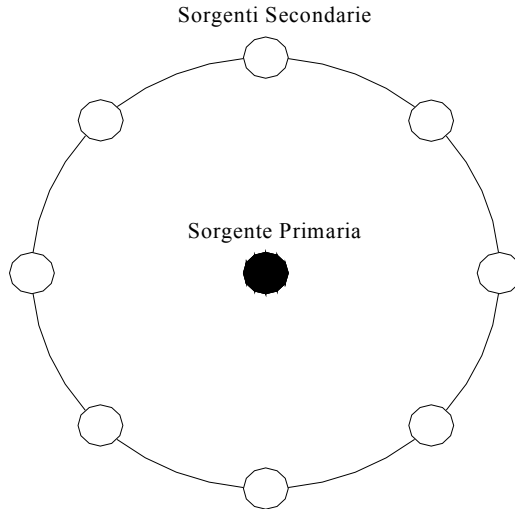


Figura 4: controllo del campo irradiato

2.3 CONTROLLO LOCALE TRAMITE INTERFERENZA

Il controllo del rumore mediante accoppiamento acustico (vedi par. 3.1) è rivolto all'eliminazione del rumore prodotto dalla sorgente primaria su tutto lo spazio circostante. Qualora si sia interessati alla sua cancellazione all'interno di un determinato volume, è possibile posizionando la sorgente secondaria nei pressi di tale volume, sfruttare il fenomeno dell'interferenza distruttiva tra le due sorgenti (vedi **figura 5**).

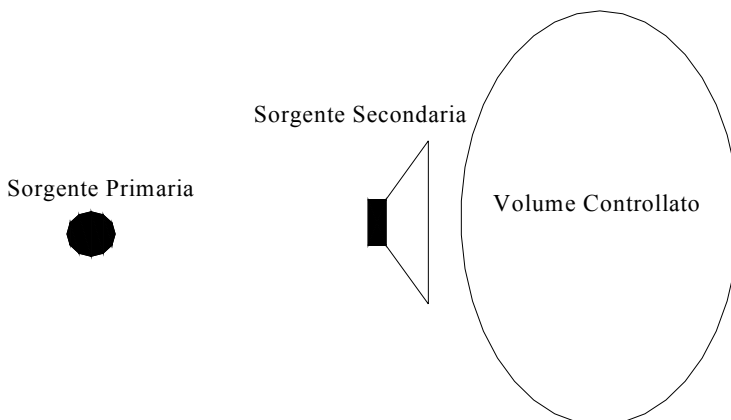


Figura 5: controllo locale tramite interferenza

Tale tecnica consente la riduzione del rumore in un volume che non si estenda oltre le 10 lunghezze d'onda rispetto alla posizione della sorgente secondaria. E' inoltre necessario, affinché la tecnica sia efficace, che le dimensioni fisiche delle sorgenti siano piccole rispetto alla massima lunghezza d'onda del rumore che si intende cancellare. E' inoltre da tener presente nella regione esterna al volume controllato, l'interferenza tra le due sorgenti può divenire costruttiva e produrre dunque effetti peggiori di quelli che si avrebbero in assenza di controllo.

3. SISTEMI DI CONTROLLO ELETTRONICO

Gli obiettivi del controllo attivo del rumore sono essenzialmente la generazione di una zona di quiete, l'assorbimento di potenza sonora e, infine, ma non per ultimo, la minimizzazione della potenza acustica totale emessa da una sorgente primaria. I possibili approcci tecnici del controllo sono fondamentalmente due:

- Il primo consiste nel sintetizzare la forma d'onda della sorgente secondaria elaborando il rumore primario e reinserendolo nel sistema fisico (sistemi feedback e feedforward); tale approccio è stato inizialmente realizzato mediante circuiti analogici. Negli ultimi anni, si è invece fatto uso di particolari filtri digitali (adattivi) che, variando i propri coefficienti in base ad algoritmi opportuni (si citano ad esempio gli algoritmi di tipo LMS (Least Mean Square) o FxLMS (Filtered-x LMS)), consentono alla sorgente secondaria di antirumore di inseguire con particolare efficacia le variazioni del segnale di rumore primario [2].
- Il secondo si basa sulla conoscenza a priori del rumore primario ed è denominato approccio modale. Questo secondo metodo è molto semplice ma la sua efficacia è limitata alle applicazioni in cui il rumore primario è concentrato su poche componenti in frequenza.

4. APPLICAZIONI DEL CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE

Allo stato attuale, esistono diverse applicazioni di sistemi di controllo attivo del rumore. Essi, costituiti tipicamente da dispositivi elettroacustici e/o piezoelettrici, sono equipaggiati con altoparlanti, microfoni, attuatori piezoelettrici, filtri, amplificatori e sistemi digitali di elaborazione numerica del segnale. Per l'elaborazione numerica dei segnali si fa generalmente uso di schede DSP di ultima generazione opportunamente implementate con algoritmi di calcolo adattivi. Nel seguito, è riportata la descrizione dello stato dell'arte relativo all'applicazione di tali tecniche alle problematiche di rumore in ambiente di lavoro.

4.1 CONTROLLO ATTIVO ALL'INTERNO DI TUBAZIONI

L'applicazione di sistemi di controllo attivo al rumore che si propaga all'interno di tubazioni ha avuto larga diffusione, dal disegno originale di Lueg in poi, in particolare per la riduzione del rumore all'interno dei condotti dell'aria condizionata ed allo scarico di motori a combustione interna. Nell'ambito delle applicazioni relative all'ambiente di lavoro, particolare interesse può suscitare l'impiego di tali sistemi allo scarico di gruppi elettrogeni, anche in combinazione con tecniche di

controllo passivo. In tal caso, si prevede l'impiego di microfoni o altoparlanti come sensori di acquisizione di segnali di riferimento e di errore, mentre l'attuatore che consente la generazione dell'antirumore è generalmente un altoparlante. In alcuni casi, tale tecnica prevede il ricorso ad un unico altoparlante che funge, alternativamente, da sensore e da attuatore. L'algoritmo di controllo deve consentire al segnale di antirumore di "seguire" le variazioni del segnale di rumore al fine di consentire una efficiente e continua riduzione dello stesso. E' per tale motivo che il controllo attivo all'interno delle tubazioni ha avuto significativa diffusione per la riduzione dei livelli di rumore prodotti allo scarico di motori a combustione interna a regime di rotazione costante (scarico di gruppi elettrogeni), un'applicazione sicuramente più semplice ed economica da realizzare rispetto al caso di motori a regime variabile (scarico di autoveicoli, motoveicoli e macchine di manovra ferroviarie). Per tali applicazioni, gli interventi tradizionalmente attuati per ridurre il rumore sono costituiti da sistemi passivi, quali barriere acustiche, coibentazione e cofanatura dei veicoli, sistemi di scarico passivi. Le emissioni acustiche a basse frequenze, quali ad esempio quelle dovute a motori a combustione interna di gruppi elettrogeni, possono però costituire un problema significativo, alla luce della scarsa efficacia per tali frequenze delle tecniche di controllo passivo. Anche alla luce di questo fatto, il Decreto del 1° Aprile 2004 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ha individuato, tra i sistemi innovativi per l'abbattimento e la mitigazione dell'inquinamento ambientale, le marmitte elettroniche, ossia dispositivi elettroacustici basati sul controllo attivo del rumore finalizzati alla riduzione dell'inquinamento acustico a basse frequenze di motori a combustione interna di gruppi elettrogeni, motopompe e compressori [3]. Allo stato attuale, sono stati realizzati alcuni prototipi di marmitte elettroniche. Ad esempio, una marmitta elettronica per motori a regime di rotazione costante è stata applicata su un gruppo elettrogeno diesel da 250 kW a Roma già nel 1996 [4]. Il prototipo (vedi **figura 6**), dal punto di vista meccanico, è costituito da una cassa in lamiera, all'interno della quale è ricavato l'alloggiamento per due altoparlanti; la forma della marmitta è tale che la parte terminale del condotto di scarico è completamente contenuto nel suo interno (vedi **figura 7**);



Figura 6: sistema di controllo attivo del rumore allo scarico di gruppo elettrogeno

la sezione di uscita dei gas è coassiale alla sezione finale della cavità. Il segnale di antirumore prodotto dagli altoparlanti si propaga attraverso la corona circolare limitata internamente dal condotto di scarico dei gas ed esternamente dalla sezione finale della marmitta.

Le pareti esterne sono trattate con materiale antivibrante, in modo da limitare le emissioni acustiche verso l'ambiente esterno. Lo spettro del rumore emesso dal gruppo elettrogeno presenta componenti principali alle frequenze di 50 Hz, 100 Hz e 125 Hz; le prime due componenti sono armoniche prodotte dallo scoppio dei gas nella camera di combustione del motore, la terza componente è causata da un fenomeno di risonanza del condotto di evacuazione dei gas combusti. Diviene fondamentale quindi la scelta degli altoparlanti poiché essi dovranno riprodurre correttamente tali frequenze; ad esempio, nel caso trattato, sono stati scelti altoparlanti la cui curva di risposta mostra un andamento costante nell'intervallo di frequenze compreso fra 40 e 600Hz.

Gli altoparlanti sono alimentati da un segnale elettrico generato da una unità di controllo ed inviato ad un amplificatore. Il regime di funzionamento costante del gruppo elettrogeno produce uno spettro acustico costante nel tempo; tale circostanza in questo caso, come in altri analoghi, consente di implementare un controllo attivo di tipo modale: il circuito di controllo genera segnali sinusoidali con frequenza pari alle componenti principali dello spettro del rumore; inoltre i rapporti fra le ampiezze dei segnali generati sono uguali ai rapporti fra le componenti principali del rumore. In **figura 8** si riporta lo schema a blocchi dell'unità di controllo. I risultati di indagini fonometriche per valutare l'attenuazione introdotta dal sistema di controllo attivo, installato presso il gruppo elettrogeno della centrale telefonica Telecom "Tor di Quinto" – Roma, sono riportati in figura 9, dove sono evidenziati i punti di misura ed i valori del livello equivalente di rumore ponderato A nei seguenti casi:

- sistema di controllo attivo spento;
- sistema di controllo attivo acceso.

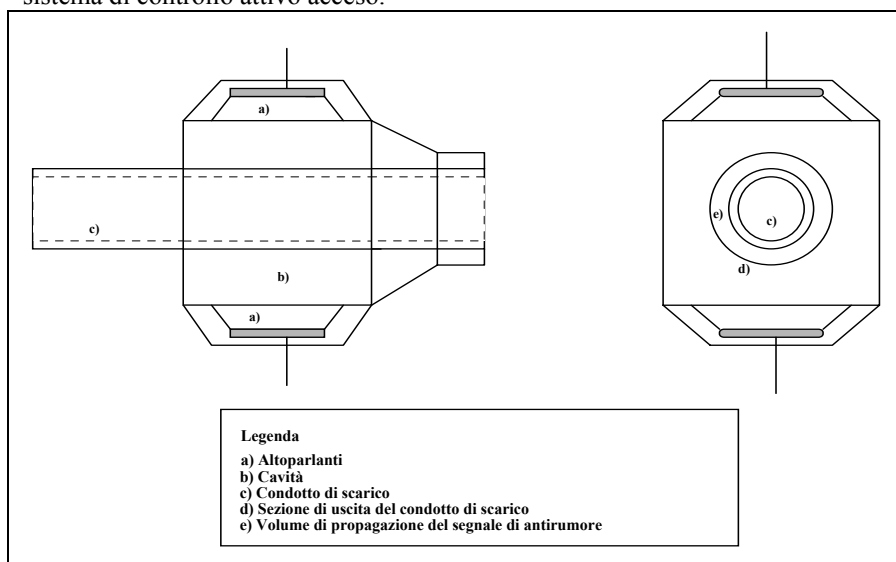


Figura 7: schema grafico della marmitta elettronica per motori a regime di rotazione costante.

Si nota come i valori riportati nella tabella di **figura 9** sono in tutti i punti superiori a 10dBA; la media è circa 12dBA. Tali prestazioni sono ottenibili per sorgenti di rumore dove sono presenti componenti a 100 e 125 Hz.

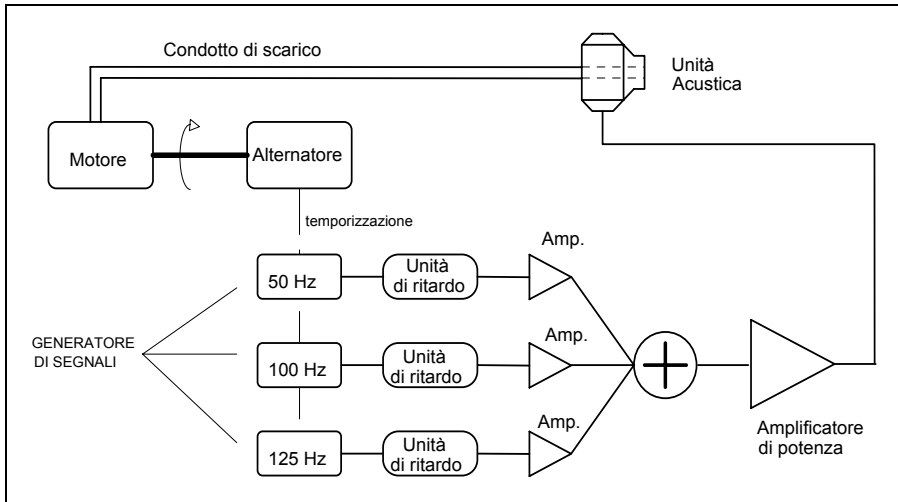


Figura 8: Schema a blocchi dell'Unità di Controllo.

L'attenuazione mediante sistemi modali è ottenuta agendo solamente sulle 3 componenti principali (50 Hz, 100 Hz, 125 Hz). Un sistema di controllo modale può quindi essere particolarmente efficace per la riduzione delle componenti di rumore prodotte allo scarico di gruppi elettrogeni, ma può presentare problematiche di continuità di controllo nel tempo.

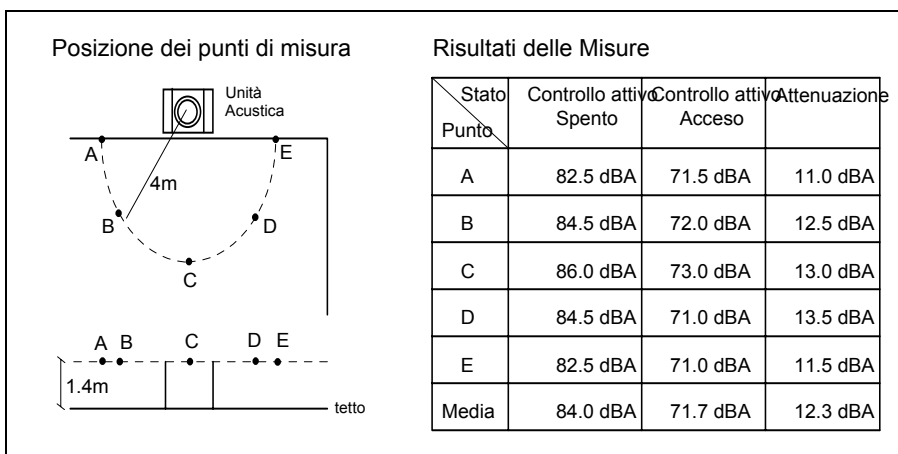


Figura 9: Disposizione dei punti di misura e relativi valori del livello di pressione acustica.

A tal riguardo, sono stati realizzati sistemi di controllo attivo adattivi, che presentano algoritmi di controllo che consentono di “seguire” con maggior efficacia

le variazioni del segnale di rumore nel tempo; per contro, le riduzioni ottenibili sono inferiori a quelle di sistemi modali. A tal riguardo, un interessante prototipo di marmitta elettronica è stato applicato al condotto di scarico di una macchina di manovra ferroviaria presso il deposito ferroviario di Siena [5]. I motori a combustione interna installati sulle macchine di manovra ferroviarie sono infatti responsabili di elevate emissioni acustiche che riguardano in particolare gli operatori del settore. La distribuzione in frequenza del rumore è proporzionale al numero di giri del motore, poiché in tal caso si parla di motore a regime variabile; inoltre circa l'80% della potenza è distribuita nell'intervallo di frequenze 30-500 Hz. I tradizionali sistemi di attenuazione del rumore, costituiti da marmitte passive installate lungo il condotto di scarico dei gas, presentano una modesta efficacia alle basse frequenze (30-500 Hz). Anche nel prototipo suddetto l'interferenza distruttiva fra il rumore prodotto dal motore e quello generato da un altoparlante avviene nella sezione di scarico. Un'unità di controllo basata su microprocessori DSP consente la generazione del segnale di alimentazione da parte di un altoparlante a partire da segnali di riferimento e di errore prelevati mediante opportuni sensori microfonici. La macchina di manovra D.245 sulla quale è applicato il prototipo suddetto, di potenza 500 kW e dotata di motore Diesel, presenta un regime di rotazione del motore che può variare da 600 rpm a 1200 rpm circa. I gas di scarico del motore defluiscono attraverso un condotto a sezione circolare. In presenza della sola marmitta tradizionale lo spettro del livello di rumore emesso, valutato mediante una campagna di misure intensimetriche, mostra una potenza acustica pari a 102 dB (a 600 giri/min) e 120 dB (a 1200 giri/min) [5]. La frequenza relativa alla componente principale del rumore è molto bassa, pari a 31.5 Hz a 600 rpm e 63 Hz a 1200 rpm. Pertanto, particolarmente critica è la scelta dell'attuatore (altoparlante), che deve essere in grado di riprodurre bassissime frequenze (fino al limite inferiore del range di udibilità umana) ed elevate potenze. Sulla base delle precedenti considerazioni, la cassa acustica nell'applicazione suddetta presenta pertanto le seguenti caratteristiche:

- sistema di controllo della distorsione a basse frequenze mediante accelerometro;
- altoparlante (diametro pari a 32 cm) caratterizzato da elevata efficienza fino a frequenze pari a 20Hz;
- amplificatore da 1250W rms.

In **figura 10** è riportata una fotografia della marmitta elettronica installata nella motrice ferroviaria. La forma della marmitta è tale che la parte terminale del condotto di scarico è completamente contenuta nel suo interno; la sezione di uscita dei gas è coassiale alla sezione finale della cavità. Il segnale di antirumore prodotto dall'altoparlante si propaga attraverso la corona circolare limitata internamente dal condotto di scarico dei gas ed esternamente dalla sezione finale della marmitta. Il segnale di rumore e quello di cancellazione interferiscono distruttivamente in corrispondenza della sezione finale della marmitta. L'altoparlante è alimentato da un segnale elettrico generato da una unità di controllo per l'elaborazione numerica del segnale (DSP). In **figura 11** si riporta lo schema a blocchi dell'unità di controllo, tipico di un sistema di controllo adattivo. L'unità di controllo, che genera il segnale di antirumore, è costituita da una scheda di Digital Signal Processing. L'unità di controllo viene implementata con algoritmi adattativi FxLMS, che consentono di minimizzare il segnale acustico all'uscita del condotto di scarico costituito dalla somma del rumore e dell'antirumore.

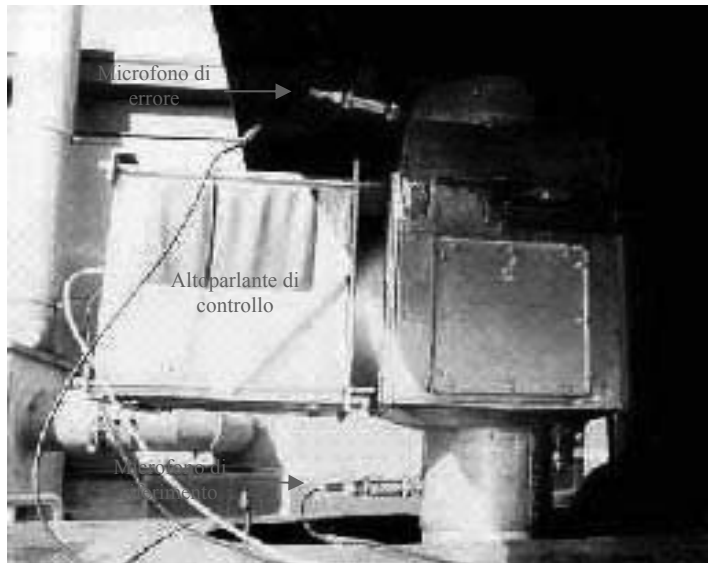


Figura 10: prototipo di controllo attivo del rumore prodotto allo scarico da macchine di manovra ferroviarie Diesel

I segnali di riferimento e di errore sono prelevati mediante microfoni inseriti in specifici supporti a monte ed a valle della marmitta elettronica.

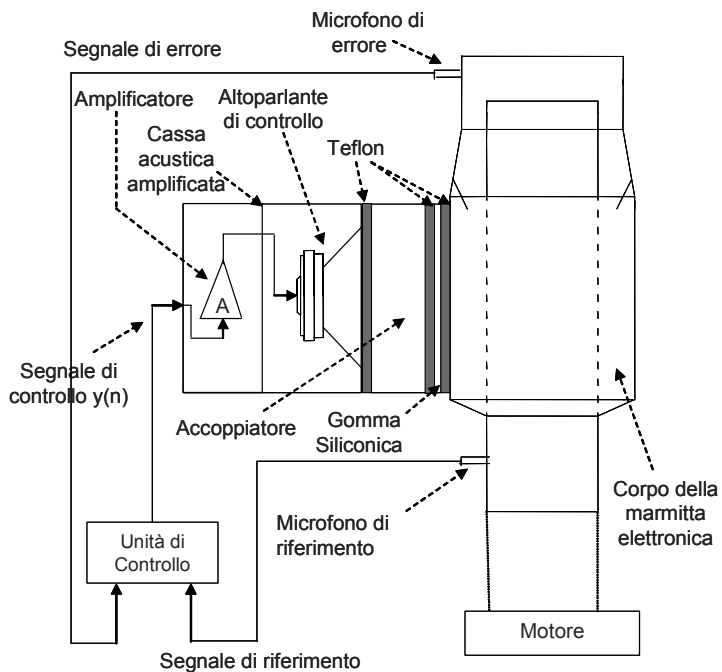


Figura 11: schema a blocchi del sistema di controllo

Le seguenti problematiche tecniche sono possibili in fase di applicazione del sistema di controllo su condotti di scarico di motori a combustione interna:

A) l'altoparlante ed i microfoni sono soggetti alle alte temperature dei gas e dei detriti di scarico;

B) I microfoni prelevano segnali corrotti da componenti ad alta frequenza dovute alle vibrazioni meccaniche, specialmente ad elevate regimi di rotazione del motore.

Perciò, risulta necessario proteggere il diaframma dell'altoparlante, ad esempio con membrana in gomma siliconica (esempio in **figura 12**). Analogamente, i microfoni dovranno essere separati dal contatto diretto con i gas di scarico mediante materiale isolante termico, che non introduca alcuna distorsione acustica. Una possibilità è quella di inserire i microfoni e l'isolante termico in condotti in materiale metallico (ad esempio ottone, vedi **figura 13**) e collegare tali condotti al corpo principale della marmitta elettronica mediante giunzioni flessibili (ad esempio in EPDM, vedi **figura 14**) in modo da isolare i microfoni dalle vibrazioni prodotte dalle pareti della marmitta durante il movimento del veicolo.

Per quanto riguarda le prestazioni acustiche del sistema di controllo suddetto, si riportano nel seguito, a titolo di esempio, i risultati di una indagine sperimentale che ha consentito di valutare l'attenuazione introdotta dal sistema di controllo attivo [5]. Nelle **figure 15 e 16**, si riportano gli spettri del livello equivalente di rumore misurato nel punto H nelle seguenti condizioni:

- sistema di controllo attivo spento (OFF) per regime di rotazione pari a 600 giri/min;
- sistema di controllo attivo acceso (ON) per regime di rotazione pari a 600 giri/min;
- sistema di controllo attivo spento (OFF) per regime di rotazione pari a 1200 giri/min;
- sistema di controllo attivo acceso (ON) per regime di rotazione pari a 1200 giri/min.

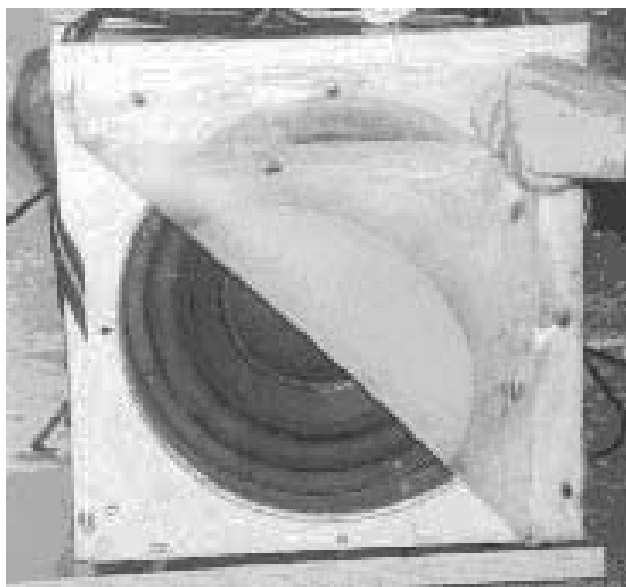


Figura 12: altoparlante di controllo protetto dalla membrana in gomma siliconica

Il valore medio dell'attenuazione valutata nei punti di misura per i due regimi di rotazione è 3 dBA; tale risultato è da ritenersi significativo poiché le frequenze principali del rumore sono inferiori ai 200 Hz e le problematiche, in termini di variabilità del regime del motore e potenza acustica emessa, sono particolarmente critiche.

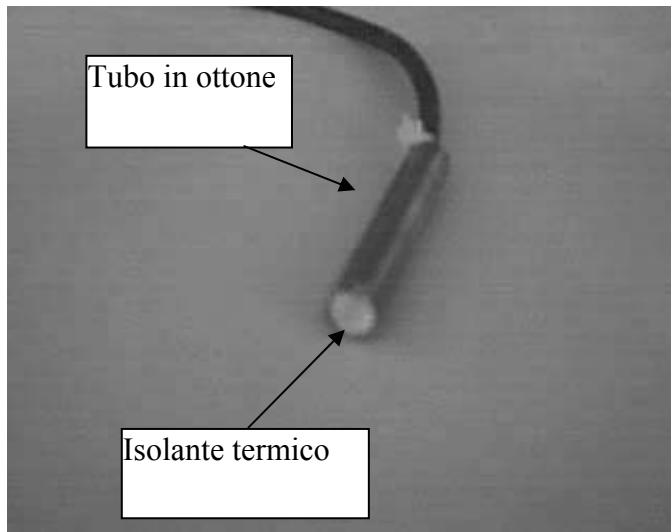


Figura 13: protezione termica dei microfoni

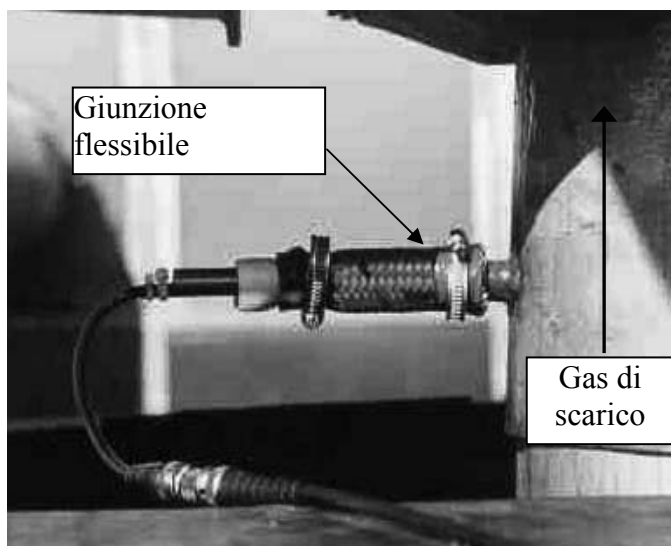


Figura 14: protezione del microfono dalle vibrazioni

L'attenuazione introdotta dal sistema di controllo sulle componenti principali è infatti superiore ai 12 dB in tutti i punti di misura. A basse frequenze il coefficiente di attenuazione dell'aria mostra valori piccoli rispetto a quelli relativi a frequenze più elevate; aumentando la distanza del punto di misura dall'uscita della marmitta elettronica, i valori dell'attenuazione sull'intero spettro del rumore aumentano.

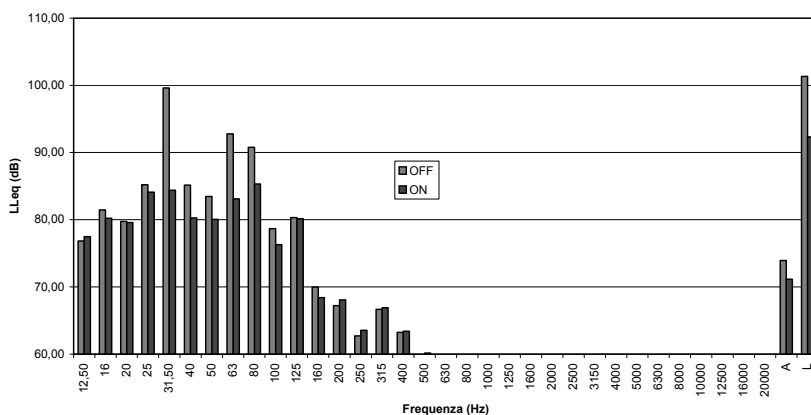


Figura 15: Confronto tra lo spettro del rumore con sistema di controllo acceso e spento (regime di rotazione 600 giri/min – punto di misura H).

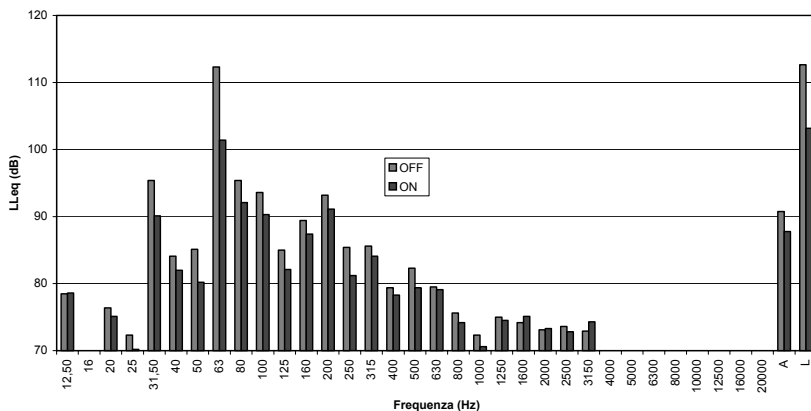


Figura 16: Confronto tra lo spettro del rumore con sistema di controllo acceso e spento (regime di rotazione 1200 giri/min – punto di misura H).

4.2 CONTROLLO ATTIVO DEL RUMORE AEREO

Il controllo attivo del rumore aereo ha trovato finora poche reali applicazioni, a causa del fatto che la riduzione del rumore, per le caratteristiche intrinseche del sistema di controllo, può avvenire unicamente a livello locale. Esistono sistemi sperimentali che hanno avuto una discreta diffusione relativi al controllo attivo del rumore in abitacoli di autoveicoli o aerei. La sola applicazione che al momento ha

trovato riscontro a livello commerciale sono però le cuffie antirumore attive. Infatti, quando macchinari e motori in ambiente di lavoro sono caratterizzati da un contenuto spettrale del rumore emesso concentrato nelle basse frequenze, i tradizionali metodi passivi di protezione dal rumore, quali le cuffie paraorecchi, presentano scarsa efficacia poiché esse si basano unicamente sull'impiego di materiali porosi che principalmente agiscono a medio-alte frequenze [1]. Esistono diverse tipologie di cuffie attive: alcune sono basate su un controllo di tipo pneumatico-idraulico, altre su sistemi analogici che, sulla base di un segnale acquisito da un microfono, invertono la fase dello stesso; infine, le più efficienti (ed anche costose) sono basate su un controllo adattivo implementato su un microprocessore. In tutti i casi, il controllo attivo è generalmente integrato con un controllo passivo che consente una migliore attenuazione delle alte frequenze. Inoltre, un altro interessante vantaggio delle cuffie a controllo attivo del rumore è che queste, al di là della riduzione del rumore, consentono in alcuni casi di ridurre selettivamente le componenti del rumore, consentendo a suoni desiderati quali il parlato e segnali di allarme di essere uditi con chiarezza..

Il successo avuto da tali dispositivi è inoltre testimoniato dal fatto che la stessa UNI ha pubblicato la norma UNI EN 352-5:2006 che riguarda proprio le cuffie con controllo attivo della riduzione del rumore (ANR: active noise reduction) [6]. La norma specifica requisiti di costruzione, di progettazione e di prestazione, metodi di prova, requisiti per la marcatura e le informazioni destinate all'utilizzatore riguardanti l'inserimento del dispositivo per la riduzione attiva del rumore. I requisiti forniti dalla UNI EN 352-5 prendono in considerazione l'interazione ergonomica tra il portatore, il dispositivo e l'ambiente di lavoro nel quale è probabile che il dispositivo sia utilizzato. La cuffia con controllo attivo della riduzione del rumore deve soddisfare anche i requisiti di sicurezza elettrica e di compatibilità elettromagnetica per quanto riguarda il circuito elettronico. La norma riporta un elenco delle informazioni che devono essere fornite dal fabbricante. Tra queste: l'indicazione se il protettore dell'udito prevede un dispositivo per la riduzione attiva del rumore, i risultati delle prove (eseguite in conformità alla norma), il nome del paese e del laboratorio che le ha eseguite, la data delle prove. Le cuffie a controllo attivo del rumore più efficaci sono basate su metodi di controllo di tipo feedforward (vedi figura 17).

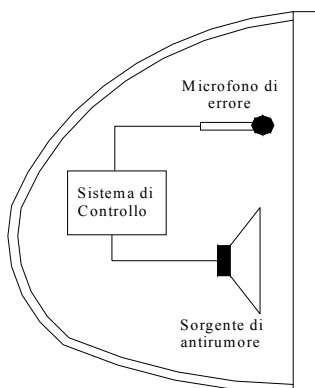


Figura 17: schema di un auricolare di una cuffia a controllo attivo del rumore

Il controllo del rumore avviene localmente, ma in questo caso è interesse proprio delle cuffie creare una zona di quiete in corrispondenza dell'orecchio dell'operatore. Tali dispositivi impiegano un microfono per l'acquisizione del rumore ed un piccolo altoparlante come attuatore. Due sono gli approcci attualmente impiegati: si possono avere controllori fissi, più semplici da implementare, basati su circuiti analogici, oppure controllori adattivi, che consentono di inseguire rapidamente le variazioni del rumore da eliminare e basati su tecniche digitali.

I campi in cui finora hanno avuto larga diffusione i dispositivi suddetti sono:

1. applicazioni militari: personale al suolo, equipaggi di mezzi armati o cingolati, piloti di aerei da caccia, personale di poligoni di tiro.
2. applicazioni aeronautiche: operatori di manutenzione, personale di terra negli aeroporti, piloti di elicotteri o velivoli privati ad alto livello di rumore.
3. applicazioni industriali: industria dell'auto, lavori pubblici, banchi prova, presse, macchine rotative, trasformatori di potenza.
4. applicazioni agricole: macchine utensili agricole, conduttori di motori diesel ad alta rumorosità, macchine per il taglio dei tronchi.
5. applicazioni sportive: impianti di tiro, rally, caschi integrali.
6. applicazioni in industria pesante: mine, industria petrolchimica, cementifici, industria metallurgica.

Per quanto riguarda le prestazioni acustiche, è possibile ottenere mediante sistemi analogici un'attenuazione di circa 15dB nel range di frequenze inferiori a 1000 Hz, mentre con controllo digitale mediante DSP si possono ottenere riduzioni fino a 50dB della componente principale del rumore.

4.3 CONTROLLO ATTIVO DELLE VIBRAZIONI

Il problema del controllo delle vibrazioni è strettamente legato a quello del rumore. Ad esempio, un macchinario che presenta un sistema rotante a basse frequenze, produce vibrazioni che possono o meno tradursi in rumore. In tal caso, il controllo delle vibrazioni a bassa frequenza mediante un supporto passivo può richiedere l'impiego di materiali troppo leggeri, che potrebbero creare problemi di mantenimento del macchinario in posizione. In questi casi, l'impiego di supporti attivi può essere fondamentale; tali supporti possono essere realizzati in materiale che garantisce una certa durezza e quindi staticità del macchinario.

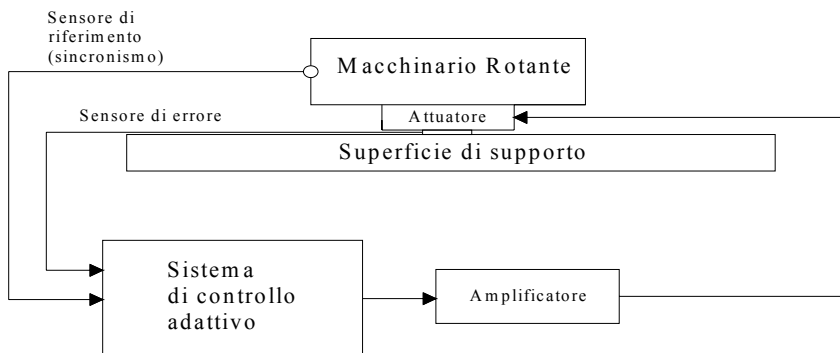


Figura 18: schema di un sistema di controllo attivo delle vibrazioni prodotte da un macchinario vibrante

Il vantaggio è quello di ridurre in maniera significativa anche l'effetto della sorgente acustica generata dalle superfici vibranti solidali al supporto. Le tecniche impiegate sono le stesse descritte in precedenza per quanto riguarda la riduzione del rumore. In questo caso, i sensori sono generalmente elementi piezoelettrici (o sensori del numero di giri), mentre gli attuatori possono essere costituiti da sistemi a pistone, shakers (scuotitori) o anch'essi elementi piezoelettrici. Uno schema a blocchi di un sistema di controllo attivo delle vibrazioni è rappresentato in **figura 18**.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. L. Beranek, Noise and Vibration Control, Mc Graw Hill, New York, 1971.
- [2] Texas Instruments, Design of Active Noise Control Systems with the TMS320 Family, Texas Instruments Application Report, 1996.
- [3] Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Linee guida per l'utilizzo dei sistemi innovativi nelle valutazioni di impatto ambientale, 1° Aprile 2004.
- [4] F. Cotana, M. Felli, F. Rossi, An Active Noise Control Device for Electric Power Plants, Convegno Internazionale Active 97, International Symposium on Active Control of Sound and Vibration, Budapest, Ungheria, 25-27 agosto 1997.
- [5] F. Cotana, F. Rossi, C. Buratti, Active Noise Control Technique for Diesel Train Locomotor exhaust Noise abatement, 144th Meeting of the acoustical Society of America, Cancun, Mexico, December 2-6, 2002.
- [6] UNI EN 352-5:2006, Protettori dell'udito - Requisiti di sicurezza e prova - Parte 5: Cuffie con controllo attivo della riduzione del rumore, 2006.