

## **IL CAMPIONE PRIMARIO DI POTENZA SONORA DELL'INRIM**

Claudio Guglielmono, Mario Corallo

INRiM , Torino

### **1. Introduzione**

La misura della potenza sonora ha molte applicazioni in campi differenti, dalla acustica edilizia alla certificazione acustica di macchine. La riferibilità di questa grandezza non è tuttavia diretta, non esiste cioè attualmente un campione di potenza sonora, ma è basata sulla misura di pressione sonora o di intensità acustica, con le quali si tarano campioni di trasferimento, le sorgenti sonore di riferimento.

Questa procedura presenta notevoli inconvenienti, soprattutto per il calcolo della incertezza delle misure. E' per questo che nell'ambito del programma European Metrology Research Programme è stato avviato un progetto per la definizione e realizzazione di un campione di potenza sonora, denominato SoundPwr nell'ambito del settore SI Broader Scope. Ulteriori attività di questo programma sono la caratterizzazione delle sorgenti di riferimento, la creazione di una sorgente tonale e il miglioramento delle procedure di misura della potenza sonora.

INRiM partecipa a questo progetto e verranno illustrati i passi per la realizzazione del campione di potenza, in [1] vi è una descrizione generale.

### **2. Definizione del campione**

Alla base del progetto vi è l'idea di costruire una sorgente la cui potenza sia calcolabile indipendentemente dalla misura della pressione sonora o della intensità acustica che emette in campo libero. La scelta è caduta su di una soluzione semplice dal punto di vista teorico, ma che come si vedrà in seguito pone notevoli problemi dal punto di vista pratico. Infatti si è deciso di costruire una sorgente costituita da un pistone circolare rigido su piano riflettente, il campo acustico risulta quindi semilibero, in accordo alla maggioranza delle applicazioni di misura della potenza sonora e indubbiamente più pratico del campo libero.

Il pistone circolare e la sue caratteristiche di radiazione sono state studiate da lungo tempo e sono ben conosciute. Il fatto di usare il piano riflettente semplifica il calcolo della pressione  $\bar{p}(x, y, z, \omega)$  nello spazio che circonda la sorgente in quanto si annulla il contributo della pressione  $\check{p}_s(\omega)$  nell'integrale di Kirchoff - Helmholtz, e si applica

l'integrale di Rayleigh, che richiede solo la conoscenza della velocità sul pistone  $\check{v}_s(\omega)$  in quanto il secondo termine in parentesi, evidenziato dal colore, legato alla pressione, si annulla poiché la riflessione crea una sorgente virtuale con velocità eguale in ampiezza ma con segno negativo.

$$(1) \quad \check{p}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi} \int_S (j\omega\rho_0\check{v}_s(\omega) \frac{e^{-\frac{j\omega r}{c}}}{r} + \check{p}_s(\omega) \frac{\partial}{\partial n} \frac{e^{-\frac{j\omega r}{c}}}{r}) dS \quad [\text{Pa}]$$

dove:

$\rho_0$  = densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = velocità del suono [m/s]

$\omega$  = pulsazione [rad/s]

$r$  = raggio del pistone [m]

$x, y, z$  coordinate cartesiane.

Si tratta di una semplificazione fondamentale, perché la misura della velocità, con velocimetri laser può essere riferita alle grandezze secondo e metro, il campione di pressione acustica non è più necessario.

### 3. Realizzazione pratica

Semberebbe che la strada a questo punto sia spianata. Osservando come sono realizzati i comuni altoparlanti, dopo più di un secolo di evoluzione, qualche dubbio prende corpo. Come si vede dalla (1), la pressione acustica nello spazio dipende dall'integrale di superficie sulla parte che vibra. Non ho scritto sul pistone, poiché purtroppo anche la parte che lo circonda è soggetto a vibrazioni parassite. Nella figura 1 è rappresentata in forma schematica la seconda realizzazione della sorgente INRiM, con pistone in alluminio di 60 mm di diametro su base in granito. Vi sono anche i punti di misura delle velocità, che sono visualizzate nella figura 2 in funzione della frequenza tra 50 Hz e 5 kHz.

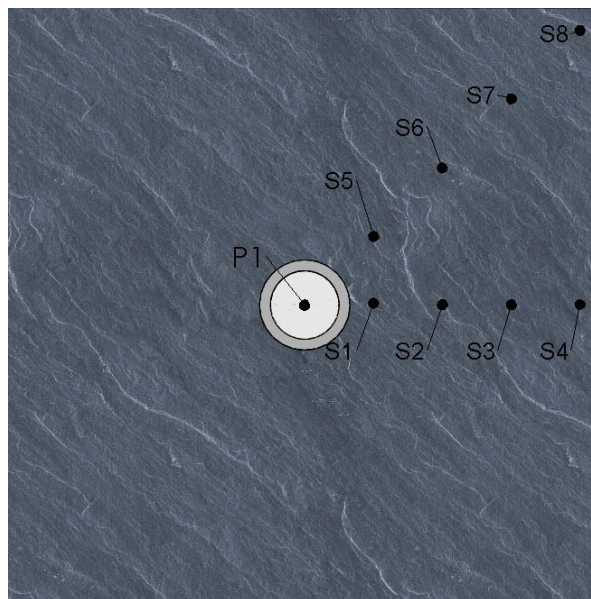


Figura 1 – Sorgente INRiM numero 2.

Si notano due problemi:

- La velocità sul pistone dipende dalla posizione alle frequenze più elevate
- La velocità della piastra di granito in alcuni punti del campo di frequenze si avvicina troppo a quella del pistone

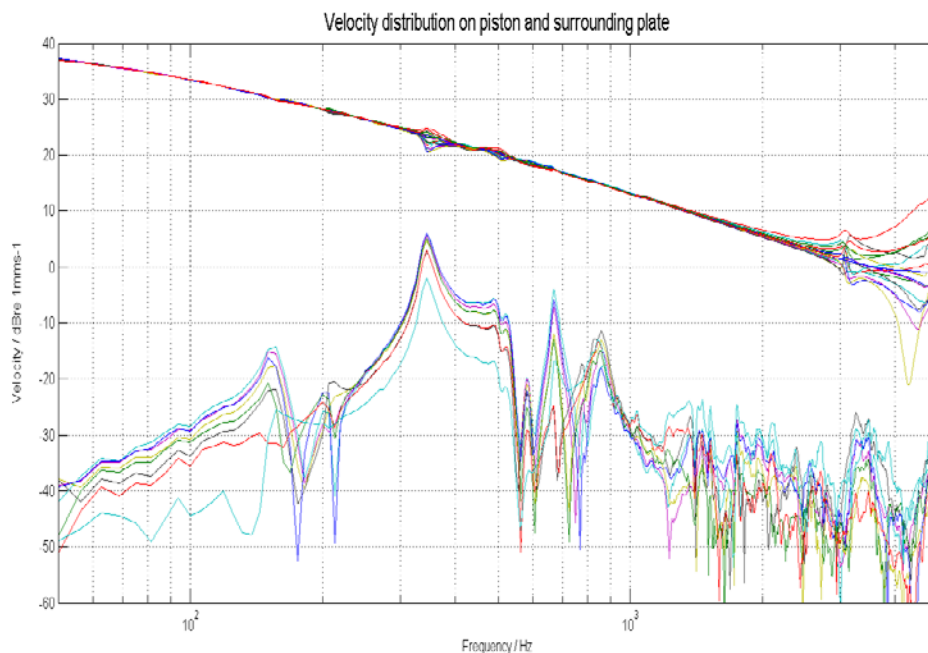


Figura 2 – Misura della velocità sul pistone e sulla superficie circostante.

La superficie della piastra è molto più grande di quella del pistone ed è pertanto necessario che la sua velocità sia di almeno 40 dB inferiore a quella del pistone per evitare interferenze con l'emissione del pistone stesso. La sorgente “numero 2” è quindi problematica nella zona intorno ai 300 Hz e alle frequenze alte.

La piastra di supporto viene messa in moto da due forze principalmente:

- L'attrito del pistone sul cilindro che lo guida, cilindro che è collegato rigidamente alla piastra.
- La forza di reazione esercitata dallo shaker o dall'altoparlante modificato, insomma dal motore elettrodinamico a bobina mobile, che spinge il pistone.

La prima forza si può ridurre principalmente riducendo l'attrito del pistone sul cilindro. Per la seconda forza, che per inciso è anche una delle ragioni per cui le casse che contengono gli altoparlanti devono essere rigide, si può cercare di ridurre la massa del pistone, ma non oltre certi limiti, un cielo del pistone troppo sottile sposta in basso la frequenza dei modi radiali del pistone stesso, che smette di essere un pistone rigido. Si può inoltre sospendere elasticamente il motore elettrodinamico e incrementare la massa, la rigidità e lo smorzamento della piastra stessa. Purtroppo materiali per la piastra che ben si presterebbero allo scopo, come il piombo, sono poco utilizzabili per motivi di reperibilità e di difficoltà di smaltimento e pericolosità.

Per il pistone si è deciso di realizzarlo in materiale plastico autolubrificante. La prima idea è di usare il Teflon®, ma purtroppo il modulo di elasticità (modulo di Young) del Teflon® è troppo basso e si avrebbero modi di vibrazione del pistone a frequenze troppo basse. Sono disponibili tuttavia polimeri cosiddetti hi-tech, e si è scelto il Cella-

zole® nella sua variante a basso coefficiente di attrito: la densità è di 1,2, il coefficiente di attrito è identico a quello del Teflon® ma il suo modulo di elasticità è 10 volte più alto, avvicinandosi a circa la metà di quello dell'alluminio. La piastra di supporto è stata realizzata con un ibrido di materiale plastico e di alluminio. In alluminio è realizzata la parte esterna, la parte interna è un disco di materiale plastico (Peek®) dello spessore di 30 mm. La scelta è caduta sul materiale plastico per via del suo maggiore smorzamento.

Si è così realizzata la sorgente “numero 3”. Nella figura 3 sono visualizzate le 3 versioni del campione di potenza sonora, la 2 è sottosopra per mostrare il motore elettrodinamico e il suo montaggio con isolamento per le vibrazioni.



Figura 3 – Le 3 versioni di campione di potenza sonora INRiM.

La sorgente “numero 3” è stata quindi provata, e la differenza tra le velocità del pistone e della piastra centrale sono visibili nella figura 4. Si vede che a partire da 300 Hz il margine è superiore a 40 dB, come richiesto. Alle frequenze basse la leggerezza della piastra in Peek pone alcuni problemi che si ritiene siano superabili con la semplice aggiunta di masse incollate. La velocità del pistone mostra un picco, dovuto in tutta probabilità ad un modo assiale del collegamento tra il pistone e la bobina mobile dell'altoparlante che funge da motore elettrodinamico.

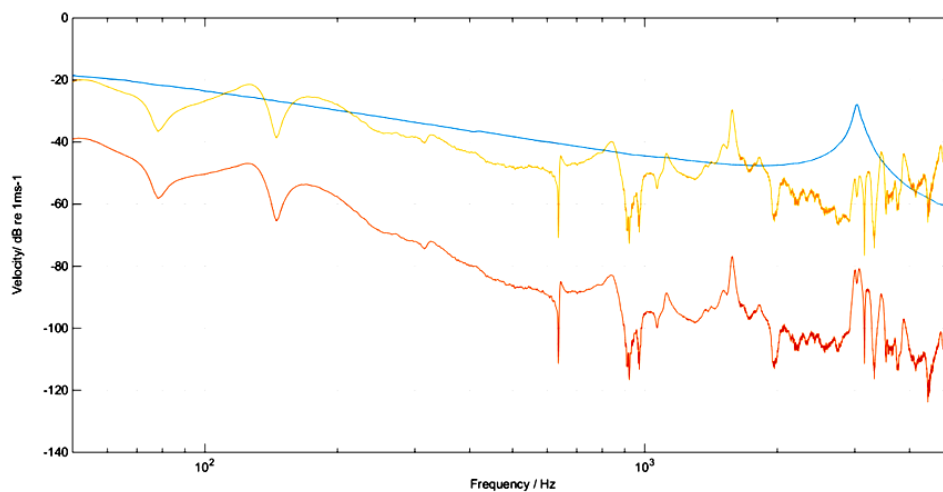


Figura 4 – Sorgente “numero 3”. La linea azzurra è la velocità del pistone, la rossa quella della piastra, in giallo la differenza.

Lo scarso attrito tra pistone e cilindro è evidente dall'ampiezza del picco, la sorgente "numero 2" (figura 2, curva in alto), in cui tra pistone in alluminio e cilindro in bronzo era presente del lubrificante (grasso al bisolfuro di molibdeno), era molto smorzata e la sua risposta non presentava picchi.

#### 4. Verifica delle prestazioni.

Conoscendo la velocità del pistone, è possibile calcolare la potenza sonora emessa  $P$  tramite la (2), nella ipotesi che il pistone si muova con la stessa velocità su tutta la sua superficie.

$$(2) \quad P(\omega, r) = \rho \cdot c \cdot \pi \cdot r^2 v_{eff}^2 \left[ 1 - \frac{J_1(2 \cdot k \cdot r)}{k \cdot r} \right] \quad [W]$$

dove:

$\rho$  = densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>]

$c$  = velocità del suono [m/s]

$\omega$  = pulsazione [rad/s]

$r$  = raggio del pistone [m]

$k$  = numero d'onda ==  $\omega/c$

$v_{eff}$  = velocità in valore efficace del pistone

$J_1$  = funzione di Bessel del primo tipo.

Dal confronto tra la potenza calcolata con la 2 e quella misurata nel campo semilibero si ha una indicazione della bontà della sorgente. Nella figura 5 sono riportate la potenza emessa dalla sorgente "numero 2" con l'ingresso di 1W nominale di rumore bianco.

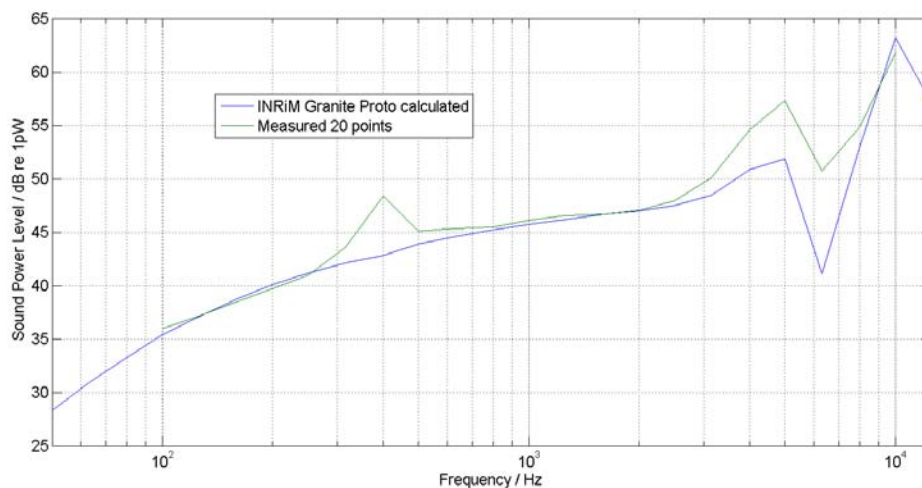


Figura 5 – Sorgente "numero 2". La linea azzurra è la potenza calcolata in base alla velocità del pistone tramite la (2), la linea verde è la potenza misurata in base alla pressione su una semisfera di 1 m di raggio in camera semianecoica.

La curva blu rappresenta la potenza calcolata tramite la (2) in base alla velocità del pistone, la curva verde la potenza misurata in camera semianecoica su 20 punti su una semisfera di 1 m di raggio secondo la norma ISO 6926. Come si vede dal picco nella

curva della potenza misurata alla frequenza di 400 Hz, l'emissione della piastra incrementa di più di 2 dB l'emissione del pistone. Gli scostamenti ad alta frequenza sono dovuti anche alla non uniformità della velocità del pistone e alla direttività, legata al raggio dello stesso. Infatti la misurazione avviene su 20 soli punti, per quanto scelti con il criterio di fare un buon campionamento spaziale.

La sorgente "numero 3" è ancora in fase di messa a punto, ma al di sopra di 300 Hz si comporta bene. Della sorgente "numero 3" esiste una versione con pistone di diametro 20 mm per le frequenze da 2 a 10 kHz. Il pistone da 50 mm infatti è troppo direttivo oltre i 3 kHz. Potrebbe essere necessario realizzare una terza sorgente per le frequenze basse, per motivi di livello massimo realizzabile, legato alla impedenza di radiazione, come si può ricavare dai classici testi di acustica, come [2].

## 5. Conclusioni

Reinventare l'altoparlante si è rivelato più difficile del previsto! Le esigenze di avere una superficie rigida che si muove con velocità uniforme, l'assenza di una sospensione elastica che avrebbe comportato una zona indefinita difficile da modellare per i programmi agli elementi finiti sono in realtà esigenze peculiari per l'applicazione campione di potenza sonora, e in pratica tutti gli sviluppi della elettroacustica non sono stati utilizzabili.

La realizzazione pratica è stata problematica, in tutti i laboratori europei coinvolti nel progetto, tuttavia allo stato attuale dei lavori l'obiettivo di realizzare un campione di potenza sonora con una incertezza minore di 0,5 dB nel campo di frequenza tra 50 Hz e 10 kHz appare realizzabile. Non è tuttavia pensabile di ottenere una sorgente in grado di coprire il campo di frequenze tra 50 Hz e 10 kHz, e anche questa è una esperienza già vista nella progettazione di altoparlanti. L'efficienza di radiazione e la direttività sono legati al diametro della sorgente e sono tra loro in conflitto, richiedendo la prima diametri più elevati possibile, la seconda più ridotti.

## 6. Riconoscimenti.

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito del Progetto EMRP Joint Research Project SIB56 SoundPwr. EMRP è finanziato congiuntamente dalle nazioni che partecipano a EMRP nell'ambito EURAMET e dalla Unione Europea.

This work was carried out within EMRP Joint Research Project SIB56 SoundPwr. The EMRP is jointly funded by the EMRP participating countries within EURAMET and the European Union.

## 7. Bibliografia

- [1] C.Guglielmone. *SoundPwr: un progetto europeo per realizzare un campione primario di potenza sonora*. 41° Convegno della Associazione Italiana di Acustica. Pisa, 17-19 Giugno 2014.
- [2] Joseph Merhaut. *Theory of Electroacoustics*. Mc Graw Hill, 1981