

## MISURA DELLA POTENZA ACUSTICA DI UNA SORGENTE CON SONDE INTENSIMETRICHE P-V

Giorgio Sacchi (1), Eleonora Carletti (2), Domenico Stanzial (1,2)

- 1) Dipartimento di Fisica Università di Ferrara
- 2) CNR Imamoter, sede di Ferrara

### 1. Introduzione

La misura della potenza sonora di sorgenti acustiche complesse rappresenta probabilmente l'applicazione principale tra le misure "classiche" di intensimetria. Rappresenta perciò un buon banco di prova pratico per testare il comportamento di due sonde dalle caratteristiche profondamente differenti: una sonda tradizionale (p-p) e una funzionante secondo il principio dell'anemometria a filamento caldo (p-v). In particolare, facendo riferimento a precedenti lavori [1-6], le misure avevano il principale scopo di valutare l'efficacia di un nuovo metodo di taratura per le sonde p-v messo a punto da due degli autori.

Le misure di potenza sonora di sorgenti sono state realizzate utilizzando una sorgente di prova a largo spettro e condotte in due ambienti molto diversi per caratteristiche acustiche: il capannone dell'istituto CNR Imamoter di Ferrara ha fornito un esempio di ambiente riverberante e disturbato, mentre la camera anecoica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara è stato scelto come esempio di ambiente controllato e con basso rumore di fondo.

#### 1.1 Metodo di misura

La potenza emessa da una sorgente può essere ricavata integrando l'intensità sonora su una superficie chiusa contenente la sorgente stessa: in termini matematici, quanto scritto è dato dalla relazione

$$(1) \quad P_w = \int_S \mathbf{I} \cdot \hat{\mathbf{n}} dS \quad [\text{W}]$$

dove  $\hat{\mathbf{n}}$  è il versore dell'elemento di superficie  $dS$ . Questo metodo presenta numerosi vantaggi, in particolare la bassa influenza dell'ambiente di misura sul risultato ottenuto. Sebbene infatti in generale siano presenti numerose sorgenti all'interno dell'ambiente, si può operativamente assumere che solo il contributo di quelle racchiuse dalla superficie è

significativo, mentre quello delle sorgenti esterne si annulla per effetto dell'integrazione, se esse generano rumore stazionario e che questo rimanga inalterato durante tutto il tempo delle misure. La scelta della superficie di integrazione è totalmente arbitraria, ma generalmente vengono utilizzate forme geometriche semplici come semisfere, semicilindri o, in questo caso, quadrati.

La scelta di una superficie cubica è stata dettata principalmente dalla facilità di realizzazione sperimentale e dalla semplicità delle misure di intensità sonora in questa configurazione: infatti, per superfici piane come le facce di un cubo l'orientamento del vettore  $\hat{n}$  è fisso e pertanto la misura dell'intensità sonora  $I$  sull'intera faccia avviene lungo una direzione costante, cosa che dal punto di vista sperimentale equivale a mantenere fisso l'orientamento del sistema di misura con una notevole diminuzione di incertezza sperimentale.

La procedura sperimentale per la misura della potenza sonora richiede prevedibilmente un'approssimazione della formula (1). Questa viene generalmente ottenuta in due modi [7,8]:

1. misurando l'intensità normale media su un'intera faccia attraverso una scansione manuale che copra uniformemente la superficie in oggetto. Si ottiene in questo modo un valore  $\bar{I}_n^i$  e la potenza sonora è data da

$$(2) \quad P_w = \sum_{i=1}^5 \bar{I}_n^i S^i \quad [W]$$

2. scomponendo la superficie in elementi di superficie. La componente normale dell'intensità viene quindi misurata al centro di ciascuno di essi e la potenza sonora viene nuovamente data dalla somma di tutti i contributi

$$(3) \quad P_w = \sum_{i=1}^5 \sum_{subdom} \bar{I}_n^i \Delta S^i \quad [W]$$

Data la maggiore precisione e robustezza, per le misure presentate in questo lavoro è stato utilizzato il secondo metodo. Come si può notare, sia la formula (2) sia la (3) trascurano il contributo di una faccia del cubo. Questo è corretto se si assume che il pavimento dell'ambiente di misura sia perfettamente riflettente, un'ottima approssimazione nei casi qui studiati.

## 2. L'esperimento

### 2.1 Gli ambienti di misura

Per il confronto è stata utilizzata una sorgente di riferimento a banda larga, B&K® mod. 4204. Le misure sono state condotte in due ambienti dalle caratteristiche acustiche molto differenti: un capannone di tipo industriale di notevole volume di circa  $10^4 \text{ m}^3$ , e una camera anecoica di grandi dimensioni.

Come si è detto, il primo fa parte dell'Istituto del CNR Imamoter di Ferrara e contiene diversi laboratori e strutture che ne complicano l'architettura: in particolare, la presenza di macchinari in funzione e superfici vibranti anche nelle vicinanze della sorgente studiata ha fatto in modo che durante le misure ci fosse un elevato rumore di fondo, 45-48 dBA (SPL).



Figura 1 – Apparato di misura nel capannone dell’Imamoter.

La grande camera anecoica del Polo Tecnologico di Ferrara è al contrario una struttura certificata, le cui proprietà sono ben documentate in letteratura. In particolare, nel caso in cui venga utilizzata in configurazione semi-anecoica, come è avvenuto per le misure qui riportate, il rumore di fondo è garantito essere al di sotto dei 20 dBA a partire da 50 Hz. Un monitoraggio preliminare del livello di pressione sonora, eseguito con il sensore di pressione della sonda Microflow<sup>®</sup> prima della sessione di misura, ha confermato questo fatto.

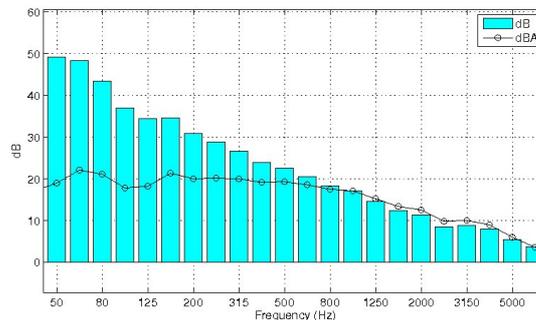


Figura 2 – Apparato sperimentale montato presso la camera anecoica di Ferrara; a destra, misura di rumore di fondo (Lp)

## 2.2 Specifiche di misura

La superficie di integrazione è stata definita tramite un cubo di lato  $1 \pm 0.01$  m, ogni faccia del quale è stata suddivisa in nove quadrati di lato 33 cm circa in entrambi gli ambienti considerati. Le misure di intensità sono state eseguite al centro di ognuno dei quadrati, secondo la procedura individuata dall’equazione (3). Le sonde p-p e p-v sono state montate in modo che i rispettivi centri acustici fossero quanto più vicini possibile, circa 0.5 cm, come mostrato in figura 3.



Figura 3 – Particolare delle sonde intensimetriche assiali p-p (destra) e p-v (sinistra)

Le catene di misura possono essere schematizzate come segue:

- la sonda intensimetrica assiale p-p è composta da due microfoni da mezzo da due microfoni da 1/2", accoppiati in fase, ed è collegata alla piattaforma di analisi PULSE della B&K®. Il modulo è quindi collegato a un notebook e guidato da software dedicato.
- La sonda intensimetrica p-v Microflown® è invece collegata, per mezzo del suo condizionatore di segnale, a un'interfaccia I/O (Motu® 896 Hd), a sua volta connessa a un notebook. Il software di acquisizione e analisi dati è stato appositamente codificato per questo sistema in ambiente Matlab®.

Il tempo di ogni registrazione è stato fissato a  $15 \pm 0.5$  s.

### 2.3 Calibrazione assoluta del sensore di pressione

Un passo preliminare ma assolutamente necessario per il confronto delle due metodiche consiste nella taratura del sensore di pressione. Se per la sonda p-p la procedura di calibrazione è ben consolidata ed è stata eseguita utilizzando il calibratore per intensità sonora B&K 4297 a 250Hz, essa è leggermente più complessa per quanto riguarda la sonda p-v. Infatti, per quanto la metodologia sia affidabile, non può essere considerata ancora uno strumento di riferimento: il microfono possiede infatti una risposta non uniforme da compensare in frequenza e, date le sue dimensioni ridotte (il microfono di pressione ha un diametro di 1/10") e la forma non standard, la taratura con metodi tradizionali risulta estremamente difficoltosa e soggetta ad errori. Sebbene fosse già disponibile una taratura assoluta e una curva di correzione, ricavata dalla procedura di calibrazione per questo tipo di sonde messa a punto in [1], si è deciso di trovare un valore ottimale di sensibilità per confronto con il valore di pressione misurato con la sonda p-p. In questo modo si è ottenuto il duplice vantaggio di un aggiornamento della taratura del sensore e dell'eliminazione di un possibile errore sistematico nel successivo confronto dei risultati: essendo il confronto tra le due strumentazioni infatti lo scopo del lavoro qui esposto, si è cercato di ridurre al minimo possibili differenze dovute a fattori esterni all'architettura dei sensori e al particolare campo acustico misurato. Se si aggiunge poi che, per quanto affidabile, il microfono utilizzato per le precedenti tarature non è stato

controllato da un centro primario da lungo tempo, è facile capire l'importanza di questa misura preliminare.

La taratura per confronto è stata eseguita mediando le differenze riscontrate tra i livelli di pressione sonora misurati nel punto centrale di ogni faccia della superficie cubica all'interno dell'ambiente acusticamente più controllato, la camera anecoica e ha portato a una ridefinizione del valore di sensibilità a  $S_p = 47 \text{ mV/Pa}$ , circa il 14% inferiore a quanto precedentemente stimato nonché una ridefinizione della curva parametrica di equalizzazione.

Il confronto tra i livelli di pressione complessivi misurati prima e dopo la taratura sono riportati in tabella 1, mentre la figura 4 mostra le differenze riscontrate in bande di terzi d'ottava.

Tabella 1 – Livelli di pressione sonora misurati al centro di ogni faccia (la E è quella parallela al terreno). In nero sono riportati i valori dati dalla sonda p-v, in rosso quelli dalla sonda p-p

	Faccia A	Faccia B	Faccia C	Faccia D	Faccia E
Imamoter	86.8 - 85.7	87.0 - 85.6	87.1 - 85.8	87.0 - 85.9	83.2 - 82.3
Camera anecoica	85.4 - 85.4	85.4 - 85.2	85.5 - 85.3	85.4 - 85.3	81.0 - 81.5

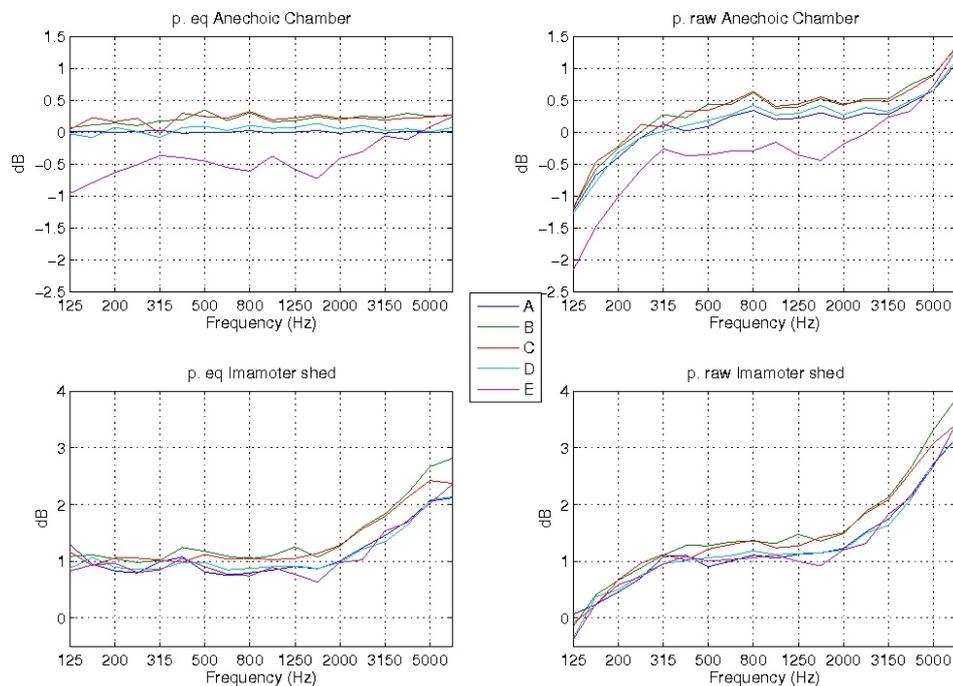


Figura 4 – Differenze tra livelli di pressione misurati con la sonda p-v e quella p-p, con (sinistra) o senza (destra) corretta equalizzazione del primo strumento. Sulla prima riga i risultati per la camera anecoica, sulla seconda per il capannone dell'istituto Imamoter.

La correzione non sembra egualmente efficace per entrambi gli ambienti: in quello più rumoroso e riverberante infatti non solo i livelli si discostano distintamente ad alte frequenze, ma rimane una differenza sistematica attorno a 1 dB anche dopo la taratura del sensore p-v. Ulteriori studi saranno mirati a comprendere se questo fenomeno sia dovuto alla diversa risposta degli strumenti al particolare campo utilizzato, come la letteratura scientifica presente in merito potrebbe suggerire, o per altri motivi non ancora evidenziati.

### 3. Risultati ottenuti

Le misure di potenza sonora sono quindi state eseguite come presentato nella prima sezione. In particolare, per la sonda p-v sono stati disattivati i filtri analogici per la correzione del sensore di velocità presenti nel condizionatore di segnale, in quanto non molto precisi e fonte di rumore di natura elettrica, mentre sono stati implementati digitalmente seguendo la calibrazione in campo di riferimento di onda puramente progressiva. La potenza totale misurata nei diversi ambienti è risultata essere in buon accordo, con una sottostima di circa 1 dB, forse segno di un errore sistematico ma comunque entro l'incertezza di misura, come mostrato nel paragrafo seguente.

Tabella 2 – Valori di potenza sonora in dB relativi a  $10^{-12}$  W

	Capannone Imamoter	Camera anecoica
Lw p-v	89.3	89.5
Lw p-p	90.3	90.4

Un confronto dei risultati ottenuti in bande di terzi d'ottava conferma in parte quanto già affermato, anche se risulta evidente il diverso comportamento degli strumenti soprattutto a basse frequenze. Come esposto nei grafici nelle figure 5 e 6, è presente una sovrastima del livello tra p-v e p-p alle basse e alte frequenze di circa 1-2 dB, fatto peraltro già documentato in letteratura [9], mentre si trova una sottostima in quelle medie. La deviazione sistematica di 1 dB trovata nelle misure di pressione tra i due ambienti non sembra influenzare particolarmente la potenza, le cui bande sono sostanzialmente uniformi nei due ambienti.

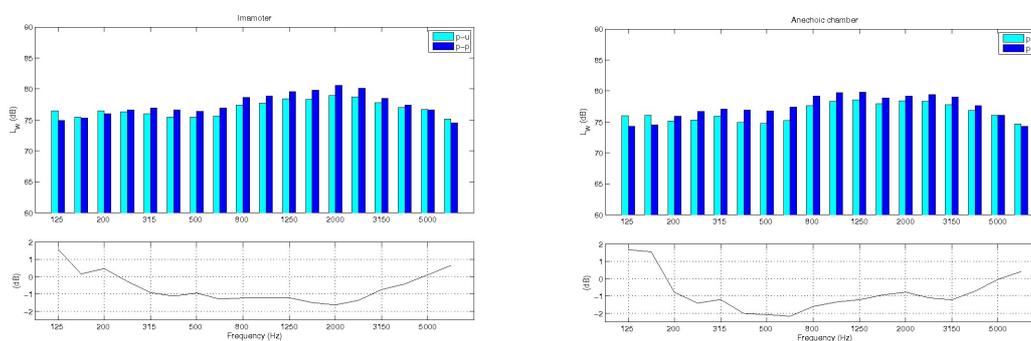


Figura 5 – Ambiente riverberante (sinistra) e anecoico (destra): livelli di potenza sonora e differenze in bande di terzi d'ottava

Per stabilire se la differenza sia dovuta all'aver erroneamente cambiato le curve di correzione, sono stati ripristinati a scopo di verifica i parametri originali (si è saltato pertanto il punto esposto alla sezione 2.3). Come mostrato in figura 7, i livelli ottenuti in questo caso sembrano migliori per le bande di frequenza tra 300 e 3000 Hz, ma decisamente scadenti al di fuori di questo intervallo, arrivando a differenze con i livelli misurati dalle sonde p-p oltre i 4 dB. Questo test conferma perciò l'assoluta necessità, pena la presenza di un errore sistematico anche considerevole, di uniformare la risposta dei sensori di pressione ogniqualvolta confronti di questo tipo vengano eseguiti.

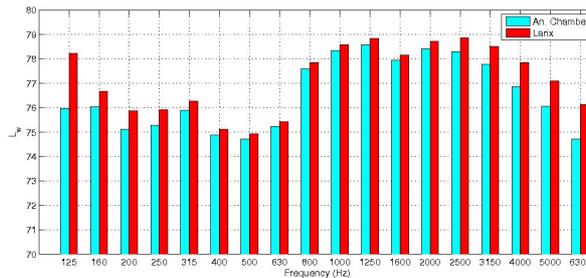


Figura 7 – Confronto tra i livelli di potenza sonora ottenuti con la sonda p-v. Az-zurro: equalizzazione su sonda p-p; rosso: taratura originale

#### 4. Determinazione delle incertezze e conclusioni

Come è stato già riportato nel paragrafo precedente, i livelli complessivi di potenza sonora ottenuti con la sonda p-v sembrano discostarsi sistematicamente di circa 1 dB da quelli con la sonda p-p. Diversi fattori possono influenzare questo risultato: la taratura ha un'incertezza di circa 0.5 dB per il sensore di pressione e altrettanto per quello di velocità; propagando questi errori assieme all'incertezza nella determinazione delle superfici di integrazione, la dispersione delle misure di potenza sonora risulta di 1.1 dB. I valori complessivi ottenuti con le due metodiche sono pertanto tra loro consistenti, mentre non sono completamente spiegate le differenze di anche 2 dB se si effettua l'analisi in bande di terzi d'ottava. Altri confronti sperimentali riportati in letteratura hanno mostrato che le cause per questi scostamenti sono molteplici e con importanza variabile a seconda del campo acustico studiato.

Per quanto riguarda in particolare le sonde p-v, a seconda delle caratteristiche del campo piccoli errori di fase durante la calibrazione possono portare a errori nei risultati sperimentali anche notevoli; al contrario, in altre situazioni una taratura rozza nelle relazioni di fase tra pressione e velocità può portare a risultati perfettamente accettabili. L'entità di questa incertezza può essere stimato dal rapporto tra intensità oscillante e intensità radiante, chiamato anche indice di reattività. Queste due grandezze sono definite rispettivamente come la parte immaginaria e reale della trasformata di Fourier del prodotto  $p \cdot v$ . In pratica, può essere dimostrato che l'intensità radiante (chiamata comunemente attiva) misurata  $I_m$ , utilizzata per il calcolo della potenza, è data dalla formula

$$(4) \quad I_m = I + Q \phi_e \quad [\text{W/m}^2]$$

dove  $I$  e  $Q$  sono rispettivamente le vere intensità radiante e oscillante e  $\phi_e$  è l'errore di fase. Studi [9] riportano che questo problema è presente soprattutto a basse frequenze, tipicamente sotto i 100 Hz, quindi esterno all'intervallo considerato in questo lavoro, a

meno di trovarsi in campi particolarmente reattivi. Un breve controllo per entrambi gli ambienti (Fig. 8) ha comunque dimostrato che questo fattore non è la fonte di incertezza per i casi qui riportati, segno evidente che altre cause vanno ricercate e che lo studio deve essere approfondito.

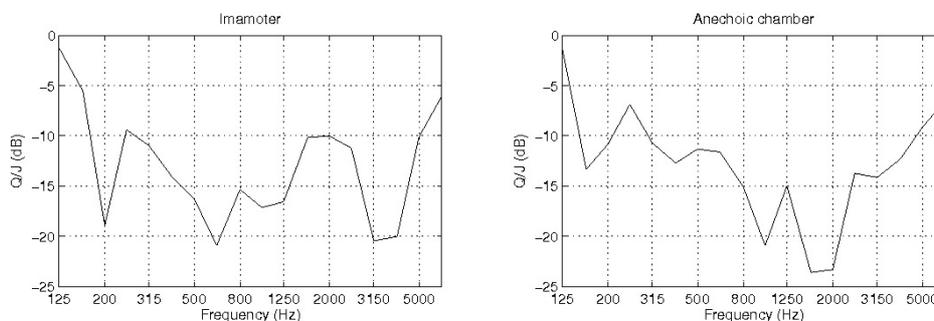


Figura 8 – Indice di reattività nel capannone Imamoter (sinistra) e in camera anecoica (destra)

## 5. Bibliografia

- [1] Stanzial D., Sacchi G., Schiffrer G., *Calibration of pressure-velocity probes using a progressive plane wave reference field and comparison with nominal calibration filters*, Journal of Acoustic Society of America, 2011 (in pubblicazione)
- [2] Sacchi G., *Calibration of pressure-velocity probes and measurement of sound power and ear canal conductance*, Tesi di dottorato in Fisica, Università di Ferrara, Marzo 2011
- [3] Sacchi G., Stanzial D., *A new method for axial p-v probe calibration*, Atti di "ICSV 16", Krakow, Poland, July 2009, paper n° 765.
- [4] Stanzial D., Sacchi G., *Taratura assoluta di sonde intensimetriche p-v*, Atti del 36° Convegno nazionale AIA, Torino, Giugno 2009.
- [5] Stanzial D., Bonsi D., Sacchi G., *Metodologia per la taratura relativa di sonde intensimetriche p-v* (italian), Atti del Seminario Strumenti e Metodi di Misura per l'Acustica e le Vibrazioni (su invito), Ancona, 22 Settembre 2008
- [6] Stanzial D., Bonsi D., Cengarle G., Sacchi G., *Procedimento ed apparecchiatura per la calibrazione di sonde intensimetriche p-v*, Atti del 35° Convegno nazionale AIA, Milano, Giugno 2008.
- [7] ISO 9614-1:1993, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise source using sound intensity: measurement at discrete points*.
- [8] ISO 9614-2:1996, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise source using sound intensity: measurement by scanning*.
- [9] Jacobsen F., de Bree H.-E., *A comparison of two different sound intensity measurement principles*, Journal of Acoustic Society of America, 118(3), , 2005, pp. 1510-1517.