

PROCEDIMENTO ED APPARECCHIATURA PER LA CALIBRAZIONE DI SONDE INTENSIMETRICHE P-V

Domenico Stanzial (1), Davide Bonsi (2), Giulio Cengarle* (2), Giorgio Sacchi (3)

(1) Consiglio Nazionale delle Ricerche, Laboratorio di Acustica c/o Fondazione Cini, Isola di San Giorgio Maggiore, 30124 Venezia. E-mail: domenico.stanzial@cnr.it

(2) Fondazione Scuola San Giorgio, Isola di San Giorgio Maggiore, 30124 Venezia

(3) Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara, via Saragat 1, 44100 Ferrara

1. Introduzione

Com'è noto l'esecuzione di una misura richiede che gli strumenti utilizzati a tale scopo siano stati preventivamente sottoposti ad un processo di taratura o "calibrazione". Il metodo universalmente utilizzato per questa operazione consiste nel misurare una grandezza che in condizioni sperimentalmente controllate (condizioni di riferimento) assuma un valore noto a priori detto anche "valore vero". La misurazione va eseguita con lo strumento non ancora tarato e, al di là degli errori sperimentali, la differenza che viene sistematicamente riscontrata tra il valore vero e quello effettivamente misurato viene attribuito alle caratteristiche proprie dello strumento di misura utilizzato. L'esecuzione del procedimento di taratura può essere più o meno complicata dalla particolare natura della grandezza fisica da misurare, nonché dai principi di funzionamento e di progettazione dello strumento. In particolare, come nel caso che qui ci interessa, le sonde intensimetriche assiali sono progettate per misurare localmente le forme d'onda concatenate di pressione acustica e delle componenti di velocità delle vibrazioni dell'aria lungo direzioni ben definite in un sistema di riferimento solidale alla sonda. I "valori veri" teoricamente prevedibili per i segnali di pressione e velocità sono calcolabili in forma analitica per alcune situazioni di campo notevoli. Una panoramica delle possibilità attualmente utilizzate per la taratura delle sonde intensimetriche è data in [1], mentre alcuni dettagli possono essere trovati in [2] per il caso del campo unidimensionale ad onda stazionaria (tubo di Kundt) o in [3] per la calibrazione con sorgente sferica.

In questo lavoro sarà esplorata la possibilità di utilizzare per la taratura di sonde p-v il più semplice campo ideale possibile: quello di onda piana progressiva, la cui realizzazione concreta è stata ottenuta per mezzo dell'installazione di un tubo lungo 80 m circa all'interno di un corridoio sotterraneo presso il laboratorio LARIX del Diparti-

* Attualmente affiliato a Fundació Barcelona Media – Univ. Pompeu Fabra, Barcellona, Spagna.

mento di Fisica dell'Università di Ferrara nell'ambito del progetto di ricerca europeo IP-Racine.

2. Modello teorico

Definito $x_v(t)$ il valore vero di una grandezza e $x_m(t)$ il valore della sua misura per mezzo di un dato strumento, si può ragionevolmente assumere che tali valori siano legati, per lo stesso punto di osservazione, da una relazione lineare, continua e invariante per traslazioni temporali. Sotto queste ipotesi, la relazione che dal punto di vista matematico risulta la più generale possibile è esprimibile con l'operazione di convoluzione nella variabile tempo t

$$x_m(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} k(t-\tau)x_v(\tau)d\tau =: (k * x_v)(t) \quad (2.1)$$

dove, per fissare le idee, si trascura la dipendenza della grandezza in esame da qualsiasi altra variabile. In questo modello dunque il nucleo della convoluzione k rappresenta la risposta dello strumento che, per le motivazioni sopra accennate, si suppone dipendere soltanto dalle caratteristiche di quest'ultimo. Alla luce di ciò, si può considerare che le sonde intensimetriche assiali siano caratterizzate da due funzioni di risposta $(u(t), r(t))$, che fanno riferimento rispettivamente alla misura della pressione e della velocità di vibrazione dell'aria. Se si indicano i valori veri dei campi di riferimento¹ con i simboli $p_v^0(t)$, $v_v^0(t)$ e con $p_m^0(t)$, $v_m^0(t)$ i corrispondenti valori misurati nelle stesse condizioni di riferimento, allora per la (2.1) essi sono legati dalle seguenti convoluzioni

$$p_m^0(t) = (u * p_v^0)(t), \quad v_m^0(t) = (r * v_v^0)(t)$$

che, per il noto teorema, se riscritte nel dominio della frequenza circolare ω , si trasformano nei semplici prodotti algebrici di grandezze complesse:

$$P_m^0(\omega) = U(\omega)P_v^0(\omega) \quad V_m^0(\omega) = R(\omega)V_v^0(\omega) \quad (2.2)$$

da cui

$$U(\omega) = \begin{pmatrix} P_m^0 \\ P_v^0 \end{pmatrix}(\omega), \quad R(\omega) = \begin{pmatrix} V_m^0 \\ V_v^0 \end{pmatrix}(\omega). \quad (2.3)$$

¹ Per maggiore chiarezza ogni grandezza fisica calcolata o misurata nelle condizioni di riferimento sarà connotata da uno zero in apice (es. x^0).

Come si è detto tuttavia, ogni procedimento di taratura si basa sull'ipotesi che $U(\omega)$ e $R(\omega)$ dipendano esclusivamente dallo strumento di misura e non dalla particolare forma del campo assunto come riferimento, ciò significa che la (2.2) è generalizzabile ad ogni altra possibile situazione di campo sonoro, ovvero

$$P_m(\omega) = U(\omega)P_v(\omega) \quad V_m(\omega) = R(\omega)V_v(\omega).$$

Quindi, se la sonda caratterizzata dalle risposte (U, R) viene utilizzata per misurare i segnali di pressione e velocità in un qualsiasi punto di un qualsiasi campo diverso da quello di riferimento, nelle nuove condizioni i valori veri di pressione e velocità sono dati in funzione dei valori di riferimento da:

$$P_v = \frac{P_v^0}{P_m^0} P_m, \quad V_v = \frac{V_v^0}{V_m^0} V_m. \quad (2.4)$$

Confrontando le due espressioni ottenute sopra, si può osservare che l'operazione di calibrazione di una sonda intensimetrica assiale è di fatto equivalente a determinare sperimentalmente l'operatore di ammettenza "vero" $Y_v(\omega)$, che quando applicato a P_v permette di ricostruire il segnale V_v . Tale operatore è ottenibile con semplici manipolazioni algebriche dalle (2.4). Si ha infatti

$$\frac{V_v}{P_v} = \left(\frac{V_v^0}{V_m^0} \frac{P_m^0}{P_v^0} \right) \frac{V_m}{P_m} \quad (2.5)$$

che in termini di ammettenze è riscrivibile come

$$Y_v = \frac{Y_v^0}{Y_m^0} Y_m. \quad (2.6)$$

L'espressione così ottenuta ha una semplice interpretazione geometrica: l'ammettenza vera sta all'ammettenza misurata in un campo acustico generale, esattamente come l'ammettenza vera sta all'ammettenza misurata in un campo acustico di riferimento. Ciò d'altra parte, non è altro che la naturale conseguenza dell'ipotesi di partenza che (U, R) siano esclusivamente dipendenti dallo strumento. Il fattore correttivo Γ che permette di effettuare le misure corrette dell'ammettenza acustica a partire da quelle misurate direttamente in un punto qualsiasi di un qualsiasi campo con una sonda intensimetrica "starata" è perciò dato dal seguente rapporto

$$\Gamma = \frac{Y_v^0}{Y_m^0} . \quad (2.7)$$

Tale rapporto prescrive, di fatto, anche la metodologia sperimentale da seguire per la calibrazione di ogni sonda intensimetrica assiale (cfr. [1]).

Nel nostro lavoro si è scelto di realizzare sperimentalmente il modello di campo acustico di riferimento per il quale la forma dell'operatore di ammettenza acustica $Y_v^0(\omega)$ risulta la più semplice possibile: il campo di onda piana progressiva². In questo campo infatti l'ammettenza acustica vera assume il valore di una costante reale pari al reciproco dell'impedenza caratteristica del mezzo z_0 :

$$Y_v^0(\omega) = \frac{V_v^0}{P_v^0} = z_0^{-1} = \frac{1}{\rho_0 c} \quad (2.8)$$

dove ρ_0 è la densità dell'aria in assenza di perturbazioni e c è la velocità del suono. Dalla (2.7) la valutazione di Γ è quindi ricondotta semplicemente all'esecuzione di una misura diretta di ammettenza nel campo di riferimento. Tale misura deve essere effettuata con la sonda ancora "starata" proprio perché così facendo si può determinare il fattore di correzione da utilizzare successivamente per correggere, in base alla equazione di calibrazione (2.6), tutte le misure che potranno essere ottenute in futuro con la stessa sonda.

Osserviamo tuttavia che l'equazione di calibrazione (2.6) esprime soltanto la corretta relazione teorica, prevedibile in base al modello scelto per il campo di riferimento, tra i segnali di pressione e quelli di velocità così come vengono rilevati dalla sonda. In altre parole, se si applica l'operatore d'ammettenza vera Y_v , ottenuto con la (2.6), al segnale di pressione "catturato" con il microfono di pressione assemblato nella sonda stessa, tale operazione non garantisce in alcun modo di ottenere il corretto segnale di velocità. L'errore di misura dei segnali di velocità dipende infatti direttamente dall'errore di misura del segnale di pressione. Prima di applicare Y_v per ottenere il corretto segnale di velocità V_v è dunque necessario correggere il segnale di pressione rilevato dalla sonda, ad esempio per confronto con un microfono di pressione di riferimento primario (nel nostro caso un microfono B&K mod. 4939). A tale scopo indichiamo con P_{ref}^0 il segnale di pressione misurato con il microfono di riferimento nel campo di onda piana e con P_{sonda}^0 il segnale di pressione misurato dalla sonda nello stesso campo di riferimento: allora il fattore correttivo per il segnale di pressione è dato da

$$\Pi = \frac{P_{ref}^0}{P_{sonda}^0} . \quad (2.9)$$

² Un approfondimento dei concetti di ammettenza e impedenza acustica come operatori convolutivi può essere trovato in [4]

Con queste nuove notazioni, il segnale di pressione “vero” misurato dalla sonda in un campo qualsiasi sarà dunque esprimibile in accordo con la (2.4) come $P_v(\omega) = \Pi P_m$ e dunque il vero segnale di velocità ad esso concatenato è ottenibile tramite la (2.6) come

$$V_v(\omega) = Y_v P_v = Y_v (\Pi P_m) . \quad (2.10)$$

Ciò completa la descrizione del processo di taratura cui ogni sonda intensimetrica assiale deve essere sottoposta per poter effettuare correttamente misure relative o normalizzate delle grandezze acustiche energetiche.

Osserviamo per finire che qualora si intendesse utilizzare la sonda p-v anche per la misura di grandezze energetiche “assolute”, quali ad esempio il valore dell’intensità del suono o quello della densità di energia acustica, oltre alla determinazione sperimentale della curva correttiva dello spettro di pressione acustica (2.9), si rende necessaria anche la calibrazione assoluta del microfono di riferimento. Ciò si può fare ad esempio tramite l’uso di un pistonofono.

3. Apparato sperimentale e procedura di misurazione

Allo scopo di ricreare un campo di onda piana progressiva, è stato costruito un tubo di alluminio con sezione circolare e lunghezza 84 m all’interno del tunnel del laboratorio LARIX, presso il Dipartimento di Fisica dell’Università di Ferrara. Questo ambiente garantisce la presenza di condizioni omogenee di umidità e temperatura su tutta la lunghezza del tubo minimizzando l’influenza di eventuali variazioni esterne. Il tubo è stato assemblato accostando moduli della lunghezza di 6 m (Fig. 1a), collegati tramite appositi raccordi e appesi con catenelle in modo da regolare e mantenere l’allineamento assiale, ottenuto con l’ausilio di un raggio laser.

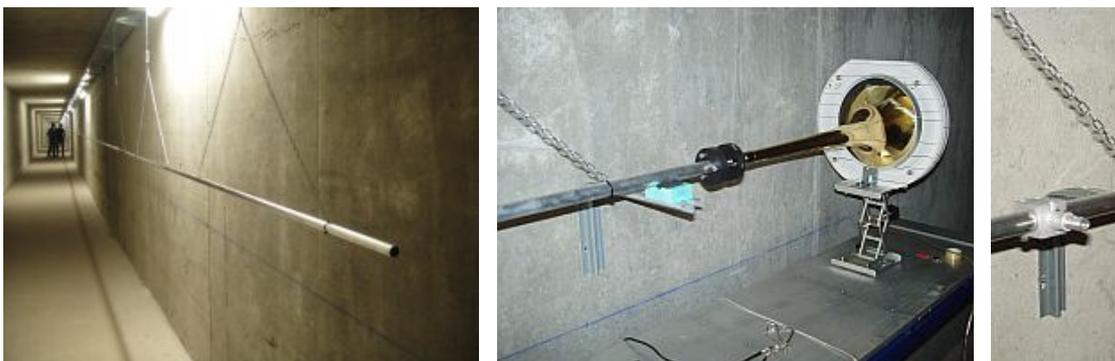


Figura 1. Apparato di calibrazione ad onde piane: a) guida d’onda acustica nel Larix b) sorgente di generazione del campo; c) dispositivo di montaggio delle sonde.

La ridotta sezione del tubo è stata scelta appositamente in modo da ottenere un campo unidimensionale per un intervallo di frequenza quanto più ampio possibile: dato il diametro del tubo infatti, pari a 2 cm, è possibile calcolare la frequenza di cut-off, oltre la quale compaiono modi di oscillazione trasversali, secondo la formula:

$$f_{cut} = 0.586 \frac{c}{2d} \approx 10kHz \quad (3.1)$$

Per generare il campo sonoro all'interno del tubo è stato utilizzato un altoparlante coassiale Tannoy mod. ic6 DC, costituito da due elementi vibranti concentrici. Tale altoparlante presenta una risposta in frequenza sufficiente a coprire lo spettro nella regione da 50 Hz a 10 kHz, com'è possibile vedere in figura 2a, sebbene la sua efficienza sia relativamente bassa per frequenze inferiori ai 200 Hz.

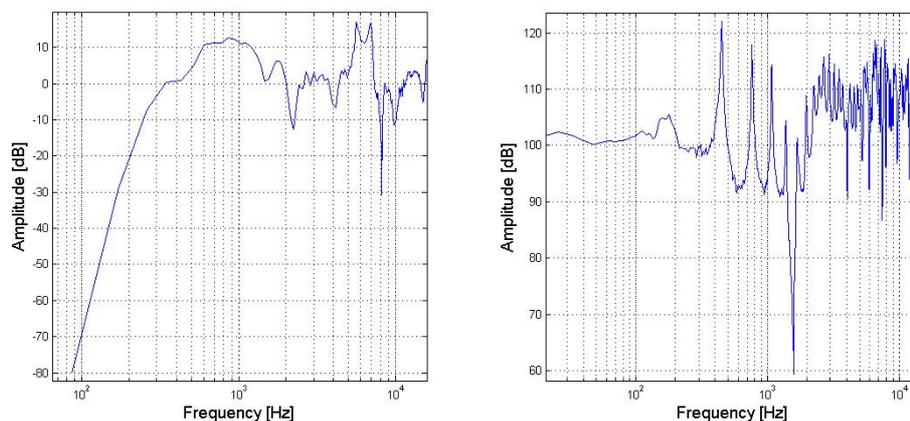


Figura 2. a) Risposta in frequenza dell'altoparlante utilizzato per il processo di taratura (sx). b) Risposta dell'altoparlante accoppiato al trombone (dx)

L'altoparlante è pilotato da un amplificatore di potenza Lab Gruppen modello Lab300. Per effettuare l'accoppiamento tra la sorgente ed il tubo, l'altoparlante è stato montato mediante una flangia sulla campana di un trombone, collegato al tubo mediante un raccordo (Fig. 1b). Ciò migliora lo spettro di eccitazione soprattutto alle basse frequenze (Fig. 2b).

A una distanza di circa 7 m dall'estremità del tubo nella quale è collocato l'altoparlante (Fig. 1c) è stato praticato un foro e installato un dispositivo di fissaggio per l'inserimento delle sonde. Le risposte all'impulso per la calibrazione sono state ottenute con una sweep logaritmica della durata di 20 s e un intervallo di frequenze da 50 Hz a 10 kHz, che tiene conto del cut-off del tubo alle alte frequenze. La generazione del segnale di eccitazione e la sua simultanea riproduzione ed acquisizione sono state effettuate per mezzo di un pc portatile con scheda audio firewire MOTU Traveler.

Le sonda intensimetrica utilizzate per il test del sistema è un trasduttore p-v Microflow[®] PU-match size. Questo tipo di sonde abbina un microfono ad elettretti da 1/10'' ed un trasduttore assiale di velocità basato sul principio dell'anemometria a doppio filamento caldo [5]. La sonda è stata inserita in modo da misurare la componente di velocità parallelamente all'asse del tubo.

4. Procedura e risultati sperimentali

Come esposto nel paragrafo 2, la metodologia di taratura consiste nel calcolare, a partire dalla misura delle risposte all'impulso di pressione e velocità nel campo di riferimento, il fattore correttivo Γ . Questo, in base alle (2.7) e (2.8), può essere riscritto come

$$\Gamma(\omega) = \frac{P_m^0}{\rho_0 c V_m^0} . \quad (3.2)$$

L'elaborazione dei dati e il calcolo della curva di correzione $\Gamma(\omega)$ sono stati eseguiti in ambiente Matlab[®] usando la routine `tfestimate`. La figura 3 mostra il risultato ottenuto rispettivamente per la curva correttiva di ampiezza e di fase. Come prevedibile, l'andamento della curva di ampiezza è tale da compensare la minore sensibilità del sensore di velocità Microflow con l'aumentare della frequenza. D'altra parte, come già notato in [1], l'andamento di entrambe le curve diventa irregolare per frequenze attorno a 7000 Hz.

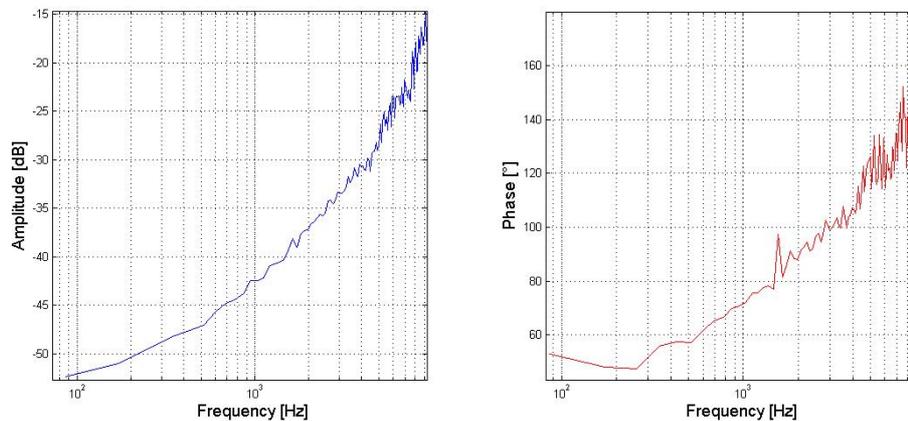


Figura 3 Curva di correzione del segnale di velocità rispetto a quello di pressione: ampiezza riferita (sx) e fase (dx)

Come si è detto tuttavia, una volta utilizzata la curva $\Gamma(\omega)$ per la valutazione dell'ammettenza vera Y_v secondo la (2.6), questa può essere applicata per ottenere il corretto valore di velocità V_v soltanto quando il segnale di pressione rilevato dalla sonda sia stato preventivamente a sua volta tarato. Per fare questo occorre procedere alla determinazione sperimentale della curva $\Pi(\omega)$ secondo la (2.9) e i risultati otte-

nuti sono riportati in figura 4. Anche questi risultati sono consistenti con il noto comportamento in frequenza del microfono di pressione in dotazione alla sonda come dichiarato dalla casa costruttrice.

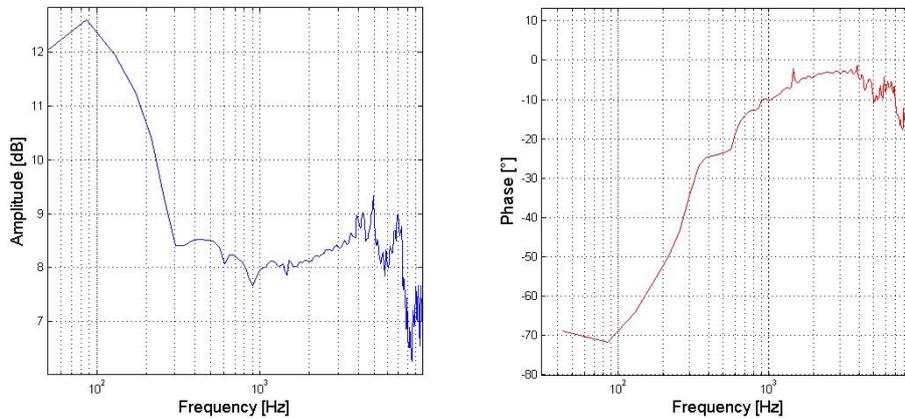


Figura 4. Curva $\Pi(\omega)$: ampiezza (sx) e fase (dx)

5. Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti in questo lavoro, pur costituendo nella sostanza un primo test sperimentale dell'impianto a guida d'onda acustica per la taratura di sonde intensimetriche p-v recentemente installato nel Laboratorio LARIX del Dipartimento di Fisica dell'Università di Ferrara, risultano chiaramente compatibili con quelli ottenuti per altri diversi campi di riferimento e già riportati in letteratura [1] per le sonde Microflown[®]. La metodologia proposta, anche se non ancora del tutto sperimentata, risulta tuttavia basata su un modello teorico completamente autoconsistente che si è inoltre dimostrato molto flessibile e robusto nella pratica sperimentale.

L'intero apparato di taratura sarà quindi migliorato a partire dall'utilizzo di un altoparlante più efficiente alle basse frequenze e dall'ottimizzazione dell'accoppiamento tra questo e la guida d'onda. Altre migliorie previste riguardano l'elaborazione dei dati sperimentali tramite la programmazione di algoritmi dedicati e l'utilizzo sistematico di dati per la calibrazione assoluta delle sonde, ottenibili con l'uso di pistonofoni o microfoni di riferimento a calibrazione certificata da laboratori metrologici primari.

Bibliografia:

- [1] Jacobsen F., Jaud V., “A note on the calibration of pressure-velocity sound intensity probes”, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol. 120(2), pp. 830-837 (2006)
- [2] Bonsi D., Stanzial D., “Calibration of the p-v Microflown® probe and some considerations on the physical nature of sound impedance”, *Euronoise Naples 2003*
- [3] De Bree H-E., Basten T., “A full bandwidth calibrator for a sound pressure and particle velocity sensor”, *Technical Report*, www.microflown.com
- [4] G. Sacchi, “Sintesi di operatori convolutivi acustici in campi confinati e applicazione alla taratura di sonde intensimetriche”, *Tesi di Laurea Specialistica in Fisica*, Università di Ferrara.
- [5] De Bree H-E. et al, “The Microflown, an acoustic particle velocity sensor”, *Sensors and Actuators: A, Physical*, volume SNA054/1-3, pp 552-557, 1996