

Capitolo 5

Calibrazione degli idrofoni BENTHOS e RESON 4042

Risultati delle misure di calibrazione svolte presso l'IDAC

Roma – 10 Giugno 2004

Come spiegato nel Capitolo 4, è necessario eseguire una calibrazione degli idrofoni BENTHOS e RESON 4042, per verificare la risposta dei sensori alle diverse frequenze di segnale. Il Capitolo 5 descrive le misure di calibrazione degli idrofoni. Le misure sono state eseguite presso l'IDAC (Istituto di Acustica "Orso Maria Corbino"), uno degli istituti del CNR, situato all'interno dell'Area della Ricerca di Roma – Tor Vergata. Per lo svolgimento delle misure sono state utilizzate le attrezzature e la strumentazione del Laboratorio di Acustica Sottomarina. Il risultato è la produzione, per ogni idrofono, di una curva di sensibilità, che definisce, in unità [dB re 1V/1 μ Pa], la risposta in frequenza nell'intervallo (5 – 25) KHz. A partire dai dati di calibrazione, si costruisce un modello per la funzione di trasferimento degli idrofoni, utile nel caso in cui si voglia sviluppare l'analisi in frequenza dei segnali. Le misure di calibrazione, inoltre, sono l'occasione per verificare l'efficienza del sistema di acquisizione.

L'Istituto di Acustica "Orso Maria Corbino" (IDAC, <http://www.idac.rm.cnr.it/>) si trova all'interno dell'area di ricerca di Roma – Tor Vergata. Le misure di calibrazione degli idrofoni BENTHOS e RESON 4042 sono state eseguite presso il Laboratorio di Acustica Sottomarina (Figura 5.1).



Figura 5.1 Il Laboratorio di Acustica Sottomarina (UAL – Underwater Acoustics Laboratory).

Il Laboratorio ospita una vasca per misure acustiche, le cui dimensioni sono 6 m (lunghezza) \times 4 m (larghezza) \times 5.5 m (profondità).

La vasca è riempita d'acqua non salata.

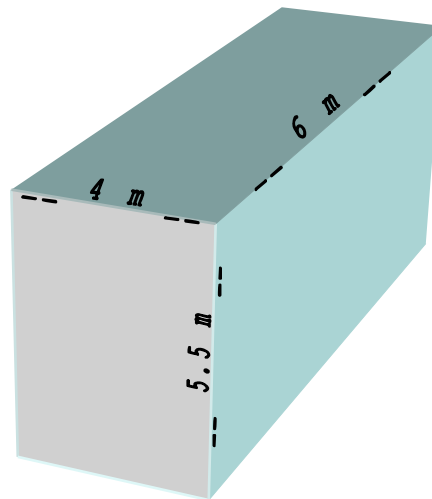


Figura 5.2 Le dimensioni della vasca.

La vasca è equipaggiata con un sistema di posizionamento, visibile in Figura 5.3, costituito da due binari indipendenti, muniti di meccanismi di movimentazione che permettono di spostare sensori e dispositivi fino ad un carico di 100 Kg, sui tre assi ortogonali, raggiungendo qualsiasi punto del volume dell'acqua.



Figura 5.3 La vasca del Laboratorio di Acustica Sottomarina. È visibile il sistema di posizionamento.

La calibrazione degli idrofoni si realizza registrando i segnali acustici prodotti in acqua da una sorgente calibrata. Presso il Laboratorio di Acustica Sottomarina ciò è possibile con l'utilizzo del sistema di calibrazione acustica RESON ACS 9060 (Figura 5.4). Le specifiche del prodotto possono essere consultate in Appendice 1.



Figura 5.4 Il Sistema di Calibrazione Acustica (ACS – Acoustics Calibration System) RESON ACS 9060.

Il sistema di calibrazione permette di programmare i parametri del segnale elettrico di input; esso è accoppiato con un proiettore, o trasduttore elettrico - acustico in trasmissione, realizzato in ceramica piezoelettrica, che converte il segnale elettrico in un segnale di pressione e trasferisce la perturbazione al volume d'acqua.

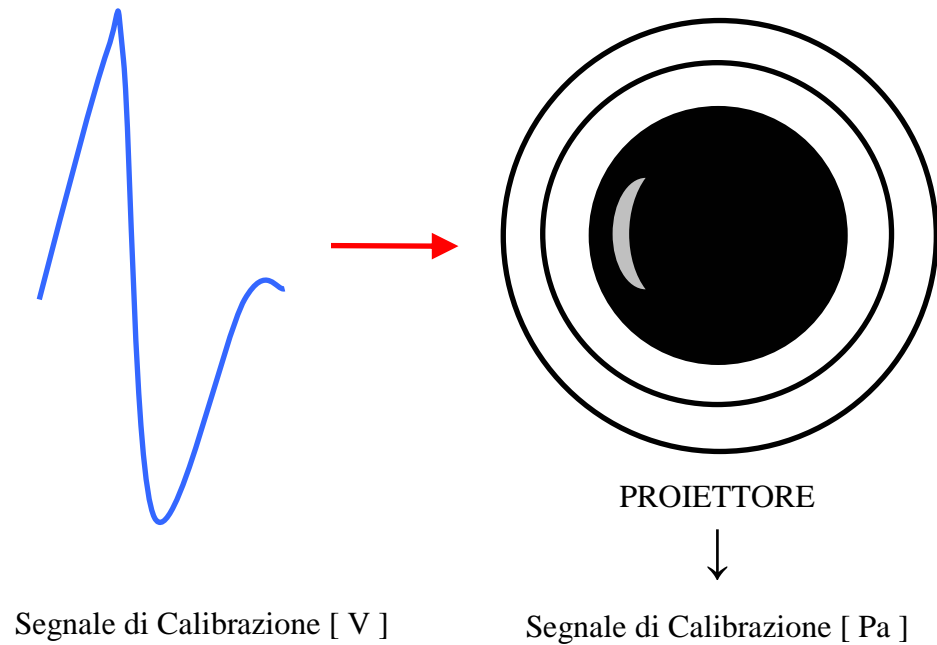


Figura 5.5 Produzione di un segnale di pressione in acqua mediante accoppiamento con un proiettore piezoelettrico.

Nel caso delle misure eseguite presso l'IDAC, il trasduttore utilizzato è il modello ITC 1007, le cui specifiche possono essere verificate in Appendice 1, oppure consultando la pagina web <http://www.itc-transducers.com/storefiles/107.pdf>. Si tratta di un trasduttore sferico che costituisce, pertanto, una buona approssimazione per una sorgente sferica.

Il sistema di calibrazione RESON ACS 9060, inoltre, è in grado di acquisire ed elaborare la risposta dell'idrofono oggetto di analisi, calcolandone la funzione di trasferimento in unità di misura convenzionali.

Lo scopo delle misure svolte presso l'Istituto di Acustica è ricavare la funzione di trasferimento Segnale in Pressione → Segnale in Tensione, in funzione della frequenza, per gli idrofoni BENTHOS e RESON 4042. Confrontando la curva di calibrazione prodotta dal sistema RESON ACS 9060 con il risultato ottenuto analizzando i dati acquisiti, sarà inoltre possibile verificare l'efficienza del sistema di acquisizione da noi sviluppato e la validità del metodo di analisi dei dati.

Lo schema seguente indica la sequenza di operazioni necessarie per completare le misure di calibrazione:

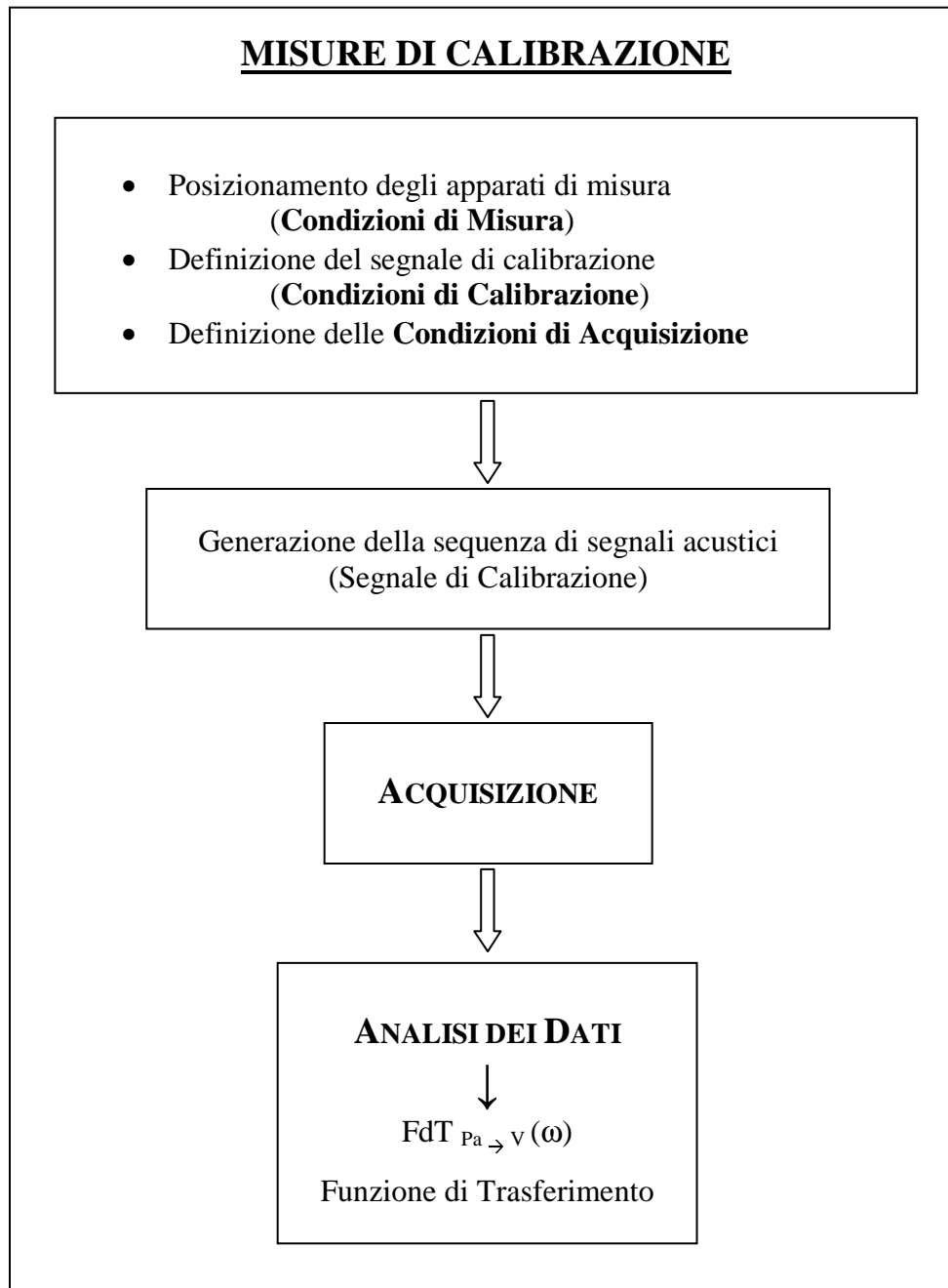


Figura 5.6 Schema delle operazioni da eseguire per una misura di calibrazione.

- *Condizioni di misura*

Con l'ausilio del sistema di posizionamento, si collocano l'idrofono e il proiettore all'interno della vasca. Al fine di limitare il più possibile l'effetto delle riflessioni che si producono quando il segnale raggiunge le pareti e la superficie della vasca, l'insieme costituito da proiettore e idrofono viene posizionato, approssimativamente, al centro del volume d'acqua; in questo modo, si limita l'effetto di sovrapposizione delle riflessioni, poiché è massimo il tempo di percorrenza del segnale riflesso.

Le condizioni di misura sono le seguenti:

- la temperatura dell'acqua è $T_{\text{acqua}} = 18.7 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$;
- la distanza proiettore – idrofono è $d = 1 \text{ m}$: questa distanza corrisponde alla distanza standard nelle misure di calibrazione industriali;
- la profondità a cui sono collocati i dispositivi è $L = 2.8 \text{ m}$: questo valore tiene conto della necessità di limitare l'effetto delle riflessioni.

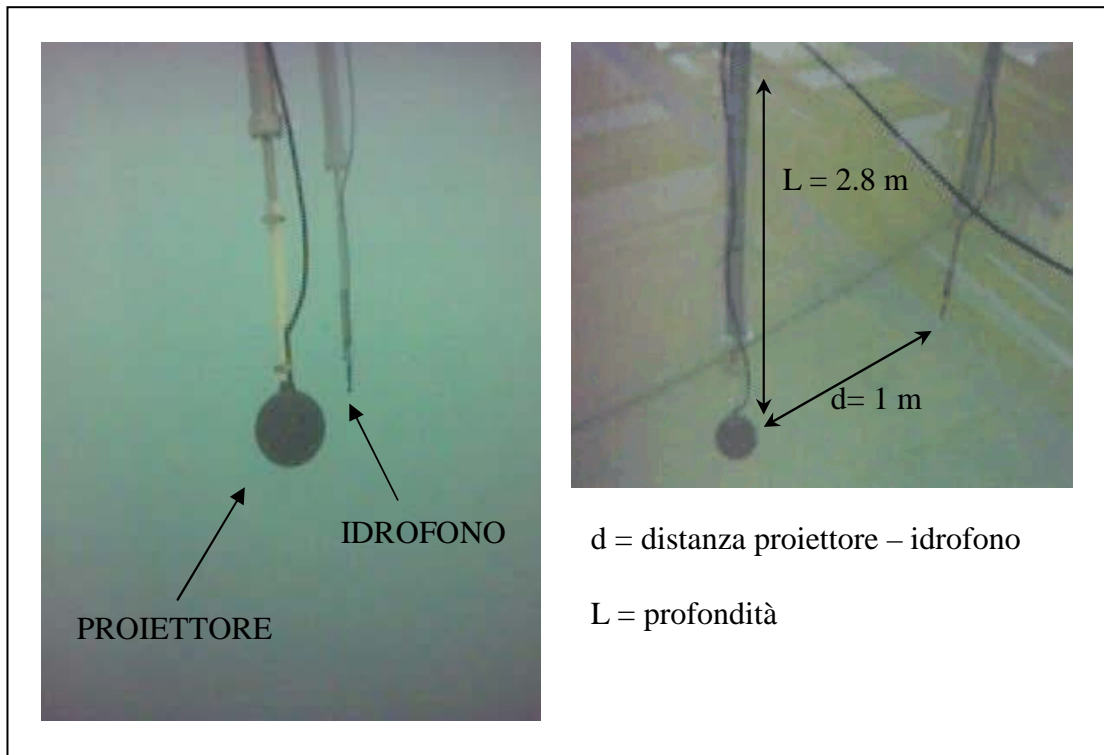


Figura 5.7 Posizione degli apparati di misura.

- *Condizioni di calibrazione*

Il sistema di calibrazione produce un segnale di tipo sinusoidale, di frequenza variabile tra 100 Hz e 5 MHz; questo intervallo di frequenza va confrontato con quello caratteristico del dispositivo trasduttore usato per produrre i segnali acustici, come descritto nelle specifiche del prodotto. Da questo confronto si ricava che la banda di trasmissione del trasduttore si estende, approssimativamente, nell'intervallo [5 – 25] KHz; pertanto, l'analisi è limitata, quindi, a questa regione di frequenze, in modo da avere un'efficace produzione del segnale di pressione. Tale l'intervallo di frequenze corrisponde anche alla regione di massima sensibilità degli idrofoni, secondo quanto indicato nelle specifiche generali di produzione.

Il segnale di calibrazione è costituito da pacchetti d'onda sinusoidali; la frequenza della sinusoide varia nell'intervallo [5 – 25] KHz, con passo di 500 Hz (“sweep” in frequenza). Per ogni frequenza, il segnale prodotto è costituito da 8 pacchetti (“ping”) della durata di 1.7 ms.

- *Condizioni di acquisizione*

L'acquisizione è avviata da un opportuno comando, il "trigger"; tale segnale è inviato dal sistema di calibrazione ogni 0.5 s; il trigger anticipa l'inizio del pacchetto sinusoidale di circa 1 ms: in questo modo, iniziando l'acquisizione nel momento in cui viene ricevuto il trigger, si conserva informazione sulla natura del segnale sorgente nella fase che precede la stabilizzazione del pacchetto.

La frequenza di campionamento dell'acquisizione è $v_C = 100$ KHz, cioè il sistema di acquisizione colleziona un campione di segnale ogni $\tau_C = 10$ μ s; l'acquisizione inizia con il trigger e prosegue per $\tau_{DAQ} = 5$ ms, per un totale di 500 campioni raccolti per ogni pacchetto sinusoidale. Come si vede dalla Figura 9, nel segmento temporale di acquisizione, τ_{DAQ} , è completamente contenuta non solo l'informazione sul pacchetto d'onda (1.7 ms), ma anche i dati sul segnale prima e dopo la produzione del pacchetto; in particolare sono visibili le prime riflessioni. In questo modo è ben caratterizzato l'effetto della perturbazione prodotta dal segnale di calibrazione. Si nota che le riflessioni non si sovrappongono al segnale, rendendo possibile l'analisi dei dati per la calibrazione.

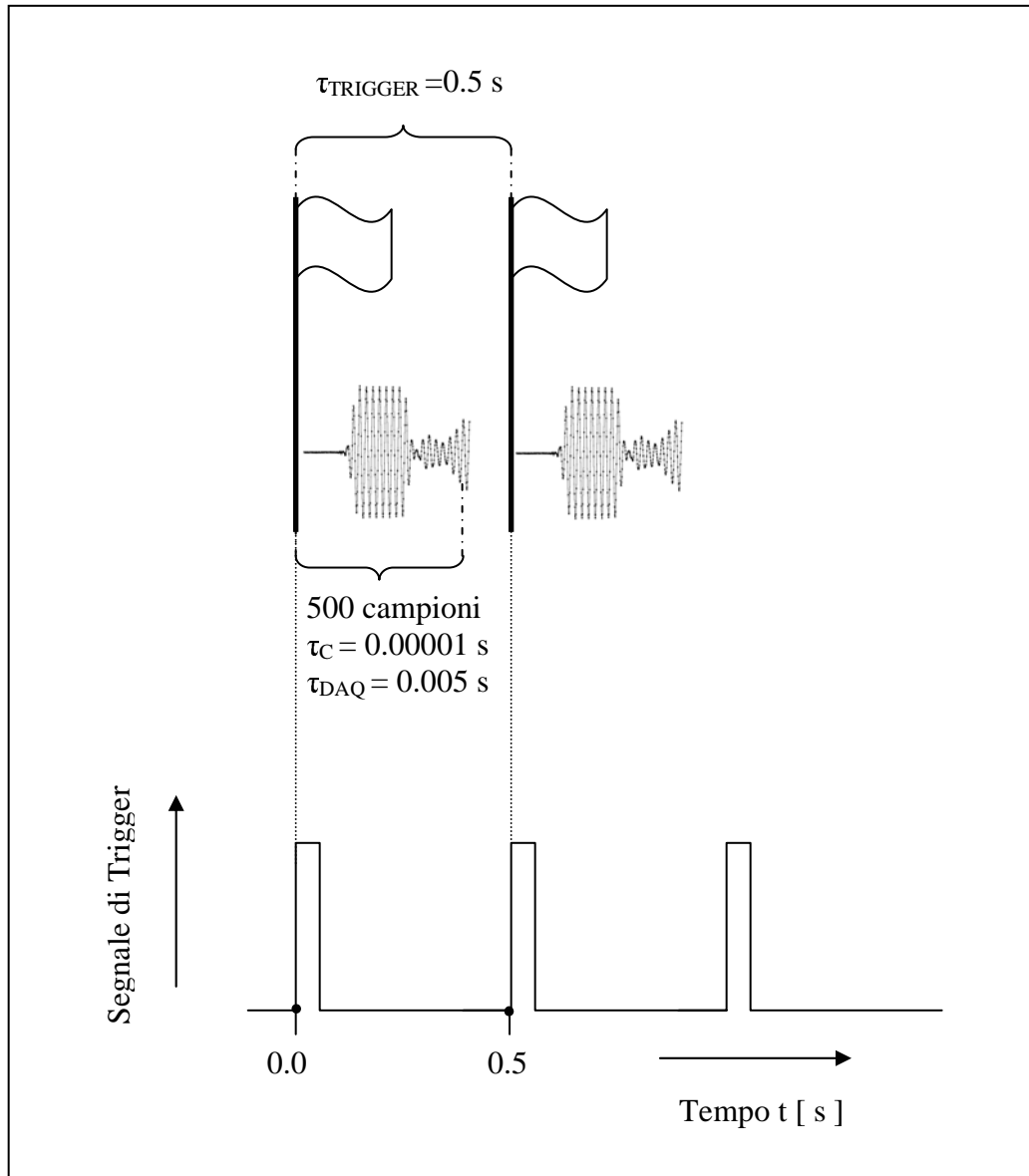


Figura 5.8 Condizioni di Acquisizione.

- *Acquisizione*

La sequenza delle operazioni (posizionamento dei sensori, definizione delle condizioni di calibrazione e di acquisizione, acquisizione) è ripetuta per entrambi gli idrofoni BENTHOS e RESON 4042, e per un terzo idrofono, RESON 4034, in dotazione presso il Laboratorio di Acustica Sottomarina, di cui è nota la curva di calibrazione. L'acquisizione dei dati dell'idrofono RESON 4034 ha lo scopo di offrire un riferimento assoluto, tramite il quale sarà possibile calcolare la funzione di trasferimento di calibrazione degli altri due idrofoni. I dettagli del calcolo e di come sono utilizzate le informazioni relative all'idrofono di riferimento RESON 4034 sono illustrati in seguito, a proposito dell'analisi dei dati di calibrazione.

Il risultato dell'acquisizione è la produzione di file di dati, in formato ASCII. I files, leggibili con un qualsiasi editor di testo, si presentano costituiti da un'intestazione (header), che contiene informazioni generali sull'acquisizione (data e ora, software utilizzato, numero di campionamenti per evento); di seguito all'header, i dati sono distribuiti su due colonne; il tempo t_0 è l'istante in cui viene ricevuto il primo impulso di trigger. Il formato dei dati, le impostazioni di visualizzazione e il contenuto dell'header sono specificati nel programma di acquisizione. Gli eventi di acquisizione, formati da 500 righe, cioè 500 campioni di segnale, sono registrati l'uno di seguito all'altro; l'informazione temporale associata a ciascuna riga e la regolarità dell'acquisizione permettono di separare gli eventi.

L'analisi dei dati è svolta con l'utilizzo del software *OriginPro 7.0*.

La prima operazione da compiere è estrarre i dati dai files, distinguendo i diversi eventi. Il programma *OriginPro 7.0* importa automaticamente i dati ASCII e trascrive il contenuto dell'acquisizione su due colonne in un foglio di lavoro. La Figura 5.9 mostra la rappresentazione di un singolo evento di acquisizione.

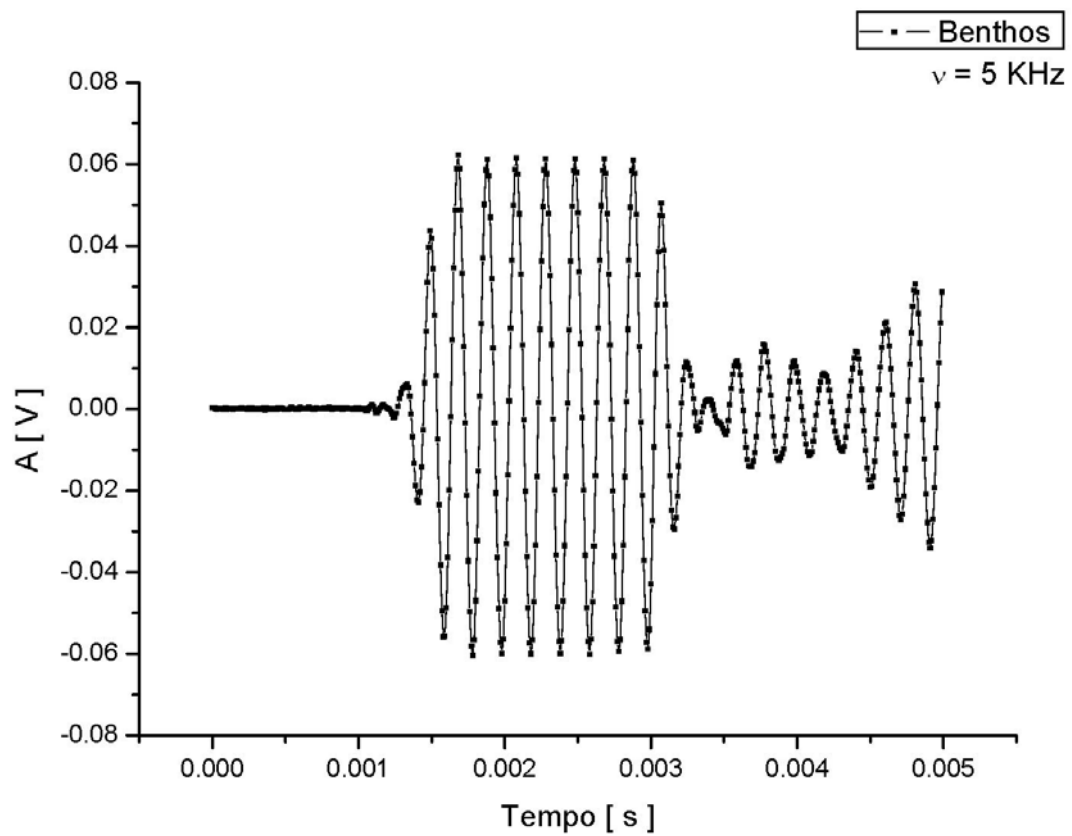


Figura 5.9 Acquisizione del segnale di calibrazione per l'idrofono BENTHOS: pacchetto d'onda sinusoidale, di frequenza $\nu = 5 \text{ KHz}$. L'evento ha una durata di 500 ms (500 campioni). Si può notare la presenza di riflessioni, che però non si sovrappongono al segnale.

Per trascurare le distorsioni del segnale dovute alla fase transitoria di produzione e interruzione del pacchetto d'onda sinusoidale, si è deciso di tagliare gli estremi dell'intervallo temporale che identifica il pacchetto, considerando solo 120 campioni in corrispondenza dell'istante centrale di ogni "treno di impulsi", per un tempo pari a 1.2 ms. Il risultato di questa selezione sull'evento è il grafico di Figura 5.10: si tratta del pacchetto sinusoidale di Figura 5.9, eliminati gli effetti di bordo.

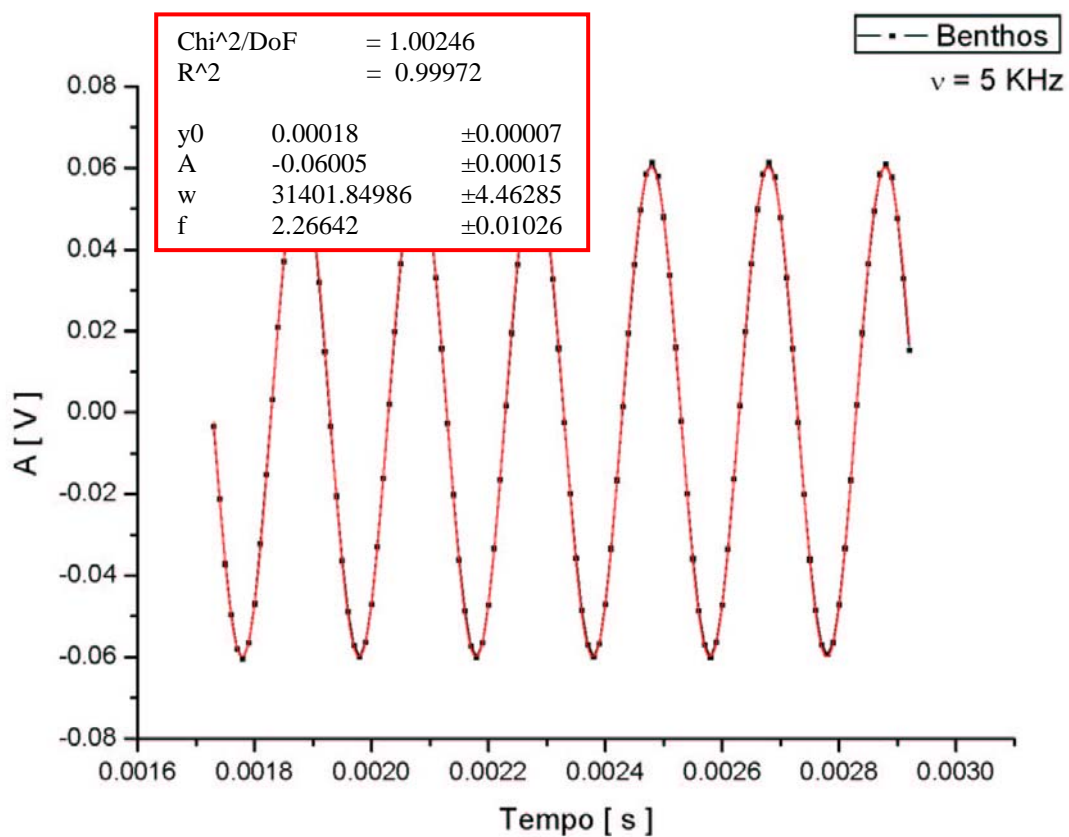


Figura 5.10 Operazione di fit sinusoidale sui dati di calibrazione (dati di Figura 5.9). Per l'analisi sono selezionati solo un numero limitato di campioni, corrispondenti al centro del pacchetto. La frequenza della sinusoide è $v = 5$ KHz.

La Figura 5.10 mette in evidenza l'operazione di "fit", ossia la rappresentazione del segnale mediante un'opportuna funzione. La funzione di fit per i dati di calibrazione è:

$$y = y_0 + A \cdot \sin(\omega \cdot x + \varphi)$$

Per ogni frequenza di calibrazione nell'intervallo [5 – 25] KHz si stima il valore dell'ampiezza del segnale sinusoidale in Volt (si tratta del parametro A della funzione di fit). Si ottiene, in questo modo, una curva che esprime la risposta in Volt dell'idrofono alle diverse frequenze di calibrazione, nelle condizioni di misura specificate.

L'unità di misura convenzionale per sensori di pressione è [dB re 1V/1μPa]; la misura rappresenta, in decibel, l'ampiezza della risposta dell'idrofono al variare della frequenza di segnale; la sensibilità dell'idrofono è riferita ("re") a quella di un sensore che presenti una risposta di 1V per un segnale di 1 μPa¹.

Per ottenere la curva di sensibilità, cioè la rappresentazione dei risultati della calibrazione in unità convenzionali (dB re 1V/1μPa), si utilizzano le informazioni disponibili sull'idrofono RESON 4034 (i dati di acquisizione, ottenuti con il sistema di acquisizione NI, nelle condizioni di misura specificate, e i dati di calibrazione, forniti dall'IDAC). Il dettaglio di questa operazione è spiegato schematicamente nel seguito, dove il termine "idrofono incognito" indica uno qualsiasi dei due idrofoni con funzione di trasferimento non nota (BENTHOS e RESON 4042), mentre con il termine "idrofono di riferimento" si intende il RESON 4034 dell'IDAC.

¹ Ad esempio, se in corrispondenza di una particolare frequenza il risultato della calibrazione per l'idrofono oggetto d'esame è -180 [dB re 1V/1μPa], questo significa che la sensibilità è 10⁻⁹ volte quella dell'idrofono di riferimento convenzionale. Il valore 10⁻⁹ si ottiene ricordando le usuali formule per la conversione V ↔ dB:

$$V \rightarrow dB \quad A[dB] = 20 * \log_{10}(A[V])$$

$$dB \rightarrow V \quad A[V] = 10^{\frac{(A[dB])}{20}}$$

Tenendo a mente questo risultato, dato un segnale di pressione, se l'idrofono di riferimento risponde con una misura di 1 V, l'idrofono in esame risponde con 10⁻⁹ V. Viceversa, se l'idrofono in esame misura un segnale di 1 V, il segnale di pressione che ha indotto la perturbazione è:

$$\frac{1[V]}{10^{-9} \left[\frac{V}{\mu Pa} \right]} = 1 \cdot 10^9 [\mu Pa]$$

Misure di Calibrazione [V] → Curva di Calibrazione [dB re 1V/1μPa]

1. Si eseguono le operazioni di fit sui dati acquisiti dall'idrofono da calibrare (idrofono incognito); si ottiene la risposta in [V] dell'idrofono in esame per ogni frequenza del segnale acustico di calibrazione, nelle condizioni di misura specificate → $A[V](\omega)$ (*idrofono _ incognito*).
2. Si eseguono le operazioni di fit sui dati acquisiti dall'idrofono di riferimento; si ottiene la risposta in [V] dell'idrofono di riferimento, per ogni frequenza del segnale acustico di calibrazione, nelle condizioni di misura specificate (come punto 1) → $A[V](\omega)$ (*idrofono _ di _ riferimento*).
3. È nota (dati forniti dall' IDAC) la curva di calibrazione in [dB re 1V/1μPa] per l'idrofono di riferimento. Tenendo conto della relazione:

$$S[V] = 10^{\frac{(S[dB])}{20}}$$

si converte l'informazione da decibel [dB] a unità lineari [V], in modo da poter confrontare con il risultato dell'acquisizione (punto 2). Le informazioni possedute a proposito dell'idrofono di riferimento (conoscenza della risposta al segnale di calibrazione $A[V](\omega)$ – punto 2 – e conoscenza della curva di calibrazione $F[V/\mu Pa](\omega)$) ci permettono di calcolare il segnale di pressione originario indotto dal sistema di calibrazione.

4. Si calcola, per ogni frequenza, il rapporto:

$$A[\mu Pa](\omega) = \frac{A[V](\omega) \text{ (idrofono _ di _ riferimento)}}{F\left[\frac{V}{\mu Pa}\right](\omega) \text{ (idrofono _ di _ riferimento)}}$$

Si ottiene, in questo modo, il segnale di pressione originario, indotto dal sistema di calibrazione, espresso in μPa.

5. Utilizzando l'informazione sul segnale di pressione (punto 4), si calcola, per l'idrofono incognito, la funzione di risposta, riferita alla calibrazione dell'idrofono di riferimento:

$$F\left[\frac{V}{\mu Pa}\right](\omega) \text{ (idrofono _ incognito)} = \frac{A[V](\omega) \text{ (idrofono _ inc)} }{A[\mu Pa](\omega)}$$

6. Tenendo conto della relazione inversa a quella scritta nel punto 3:

$$S[dB] = 20 * \log_{10}(S[V])$$

si converte in decibel l'informazione calcolata al punto 5, così da esprimere il risultato di calibrazione per l'idrofono incognito in esame nelle usuali unità di misura [dB re 1V/1μPa].

Il risultato della calibrazione per l'idrofono BENTHOS è quello descritto dalla Figura 5.11. La Figura 5.11, in effetti, mostra il confronto fra il risultato della calibrazione da noi effettuata (sistema di acquisizione NI + analisi dei dati con *OriginPro 7.0*) e il risultato fornito da una procedura di calibrazione, del tutto indipendente, a disposizione dell'IDAC (sistema RESON ACS 9060). L'ottimo accordo fra i risultati verifica l'efficienza del sistema di acquisizione NI e la validità del metodo di analisi dei dati. Infatti, confrontando le due curve di calibrazione, la differenza tra i due risultati è sempre inferiore a 1 dB, che è il valore di accuratezza con cui, generalmente, sono note le specifiche per questo tipo di sensori. Nel grafico di Figura 5.11 i dati di calibrazione ottenuti dall'analisi (NI + *OriginPro 7.0*) sono rappresentati con un errore che è la semidispersione massima dei valori.

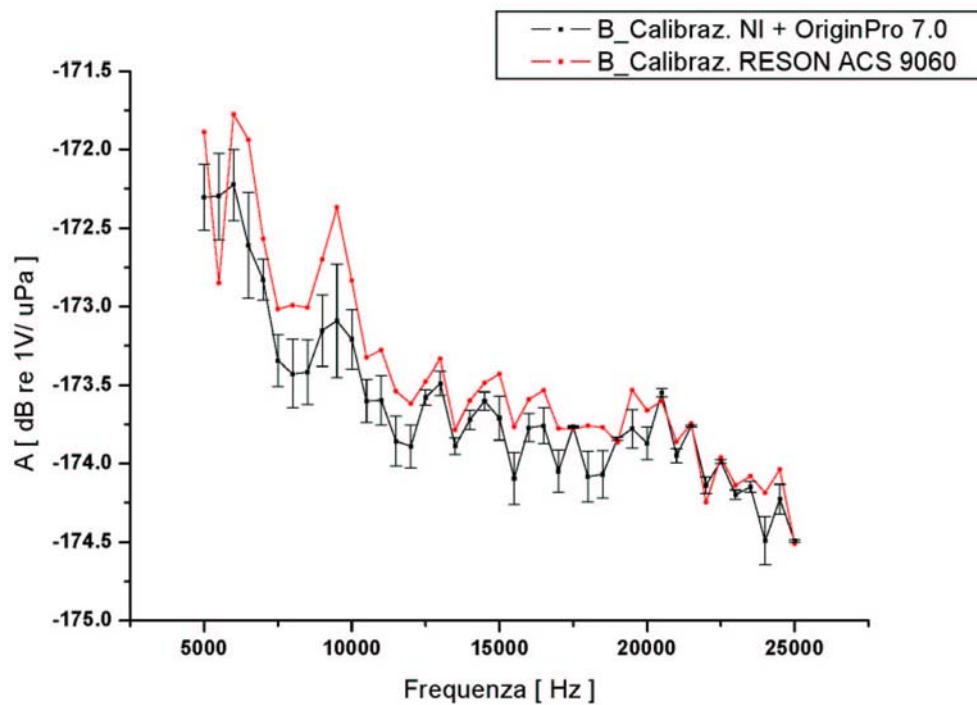


Figura 5.11 Calibrazione idrofono BENTHOS. Sono messi a confronto il risultato ottenuto con l'analisi dei dati acquisiti con il sistema di acquisizione NI e il risultato prodotto dal sistema di calibrazione RESON ACS 9060. L'errore associato ai dati è la semidispersione massima.

La Figura 5.12 mostra, in modo analogo, i risultati della calibrazione dell'idrofono RESON 4042; anche in questo caso valgono le stesse considerazioni già esposte per quanto riguarda l'accordo tra i due risultati. Confrontando, invece, la calibrazione ricavata dalle misure svolte presso l'IDAC con i corrispondenti grafici forniti dal costruttore (Figura 5.13), si osservano alcune differenze. In particolare, si ha che il valore tipico di sensibilità indicato dal costruttore è circa 10 dB superiore (migliore sensibilità) rispetto al risultato ottenuto dalle misure di calibrazione; si osserva, inoltre, un'evidente attenuazione in corrispondenza di una stretta banda di frequenze intorno al valore 7.5 KHz. Queste differenze sono riconducibili al fatto che l'idrofono RESON 4042 è stato immerso in mare per un periodo di 6 mesi, a circa 2000 m di profondità. In tali condizioni, l'idrofono, al limite delle specifiche fornite dal costruttore, potrebbe aver subito dei danni o, più semplicemente, una modifica delle proprie caratteristiche.

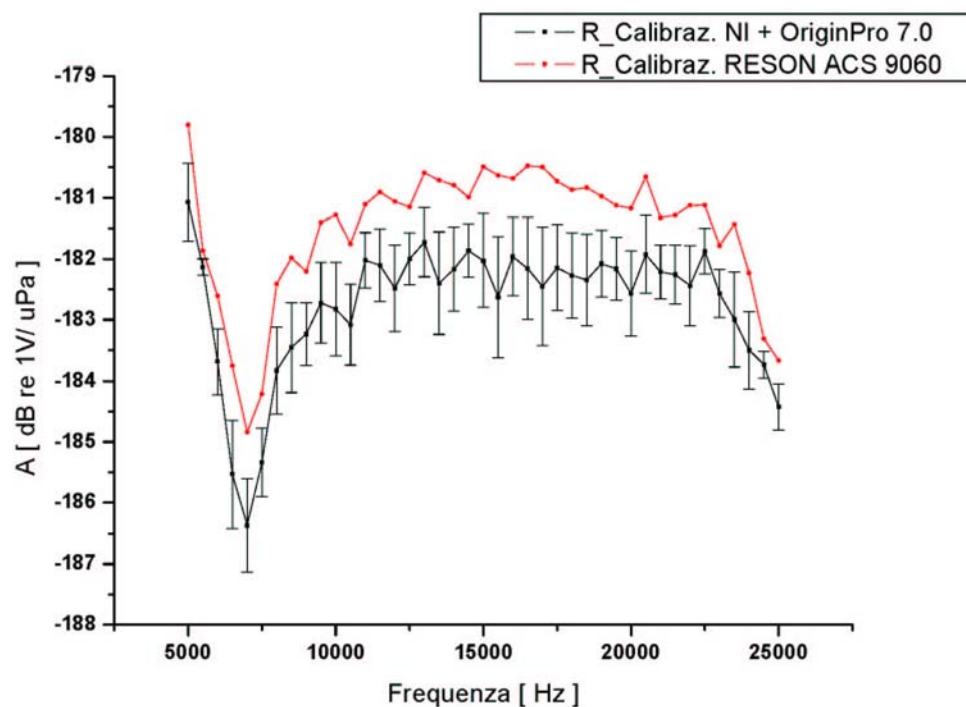


Figura 5.12 Calibrazione idrofono RESON 4042. Sono messi a confronto il risultato ottenuto con l'analisi dei dati acquisiti con il sistema di acquisizione NI e il risultato prodotto dal sistema di calibrazione RESON ACS 9060. L'errore associato ai dati è la semidispersione massima.

A causa delle caratteristiche di funzionamento del trasduttore in trasmissione ITC 1007 utilizzato per le misure, la nostra calibrazione è stata possibile in un intervallo di frequenze (5 – 25 KHz), molto limitato rispetto all'intervallo di sensibilità degli idrofoni sottomarini, che, usualmente, si estende oltre la frequenza 50 KHz. È bene, invece, considerare la risposta del sensore acustico su un più ampio intervallo di frequenze: in questo modo, infatti, come si vedrà nel Capitolo 6, è possibile l'analisi in frequenza dei segnali, la descrizione della propagazione del segnale acustico in acqua, la ricostruzione del segnale di pressione. Una prima indicazione dell'andamento della funzione di trasferimento al di fuori dell'intervallo [5 – 25] KHz si ha osservando le curve di sensibilità fornite dalla casa produttrice degli idrofoni. La Figura 5.13 mostra la curva di sensibilità per l'idrofono RESON 4042. La Figura 5.14 si riferisce a un idrofono di marca BENTHOS che ha caratteristiche operative simili a quelle del prototipo utilizzato nelle nostre misure; i dati di sensibilità sono relativi ad un idrofono senza pre-amplificatore. L'idrofono BENTHOS in nostro possesso è fornito di uno stadio pre-amplificatore il cui guadagno è pari a circa 30 dB.

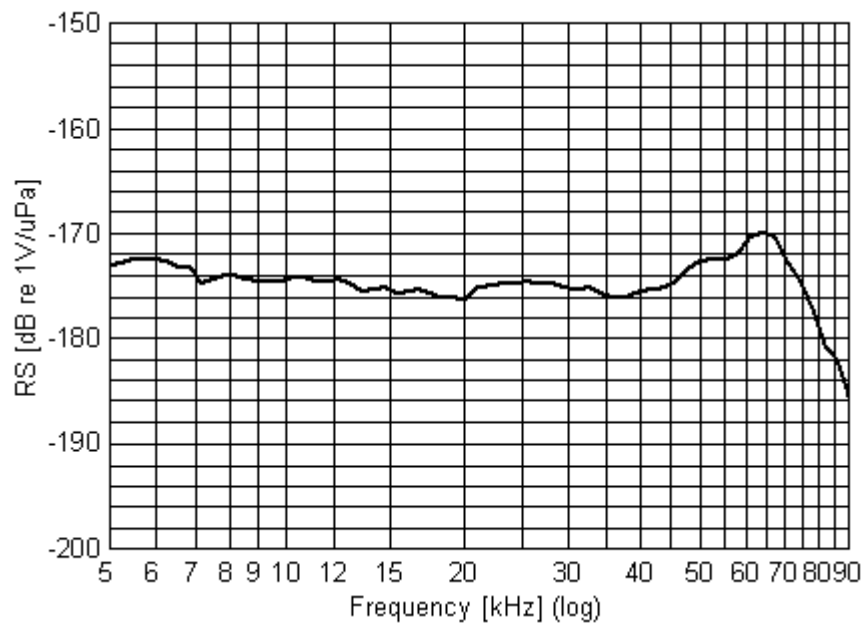


Figura 5.13 Curva di sensibilità per l'idrofono RESON 4042.

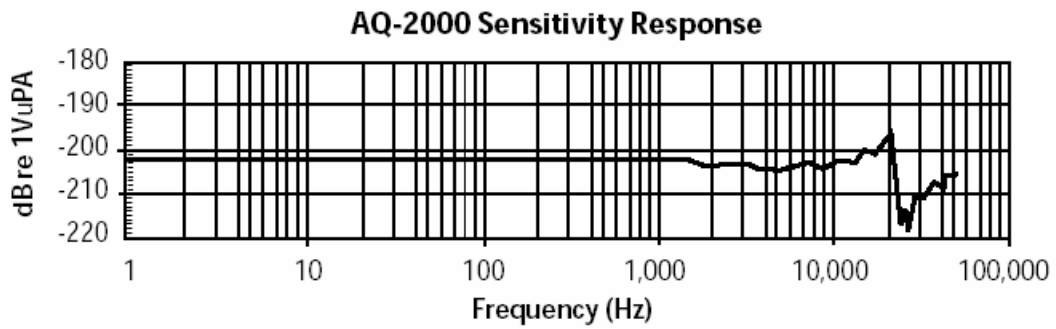


Figura 5.14 Curva di sensibilità per un idrofono di profondità di marca BENTHOS.

I valori ricavati dai grafici di Figura 5.13 e Figura 5.14 sono utilizzati per integrare l'informazione ottenuta dalle misure di calibrazione. Si ottengono, così, circa 60 punti, nell'intervallo di frequenze [1 – 85000] Hz, come mostrato in Figura 5.15 – 5.16. Ai valori “integrativi” viene assegnato un errore $\Delta y = \pm 1.5$ dB, pari all'indeterminazione generalmente associata, nelle specifiche di produzione, alle misure di sensibilità.

Il modello scelto per rappresentare analiticamente la funzione di trasferimento per l'idrofono BENTHOS è molto semplice: si tratta di un filtro passa-basso, opportunamente scalato in ampiezza, a cui si somma una gaussiana, per tenere conto dell'andamento delle curve di Figura 5.13 e Figura 5.14 nell'intervallo di frequenze [50 – 100] KHz.

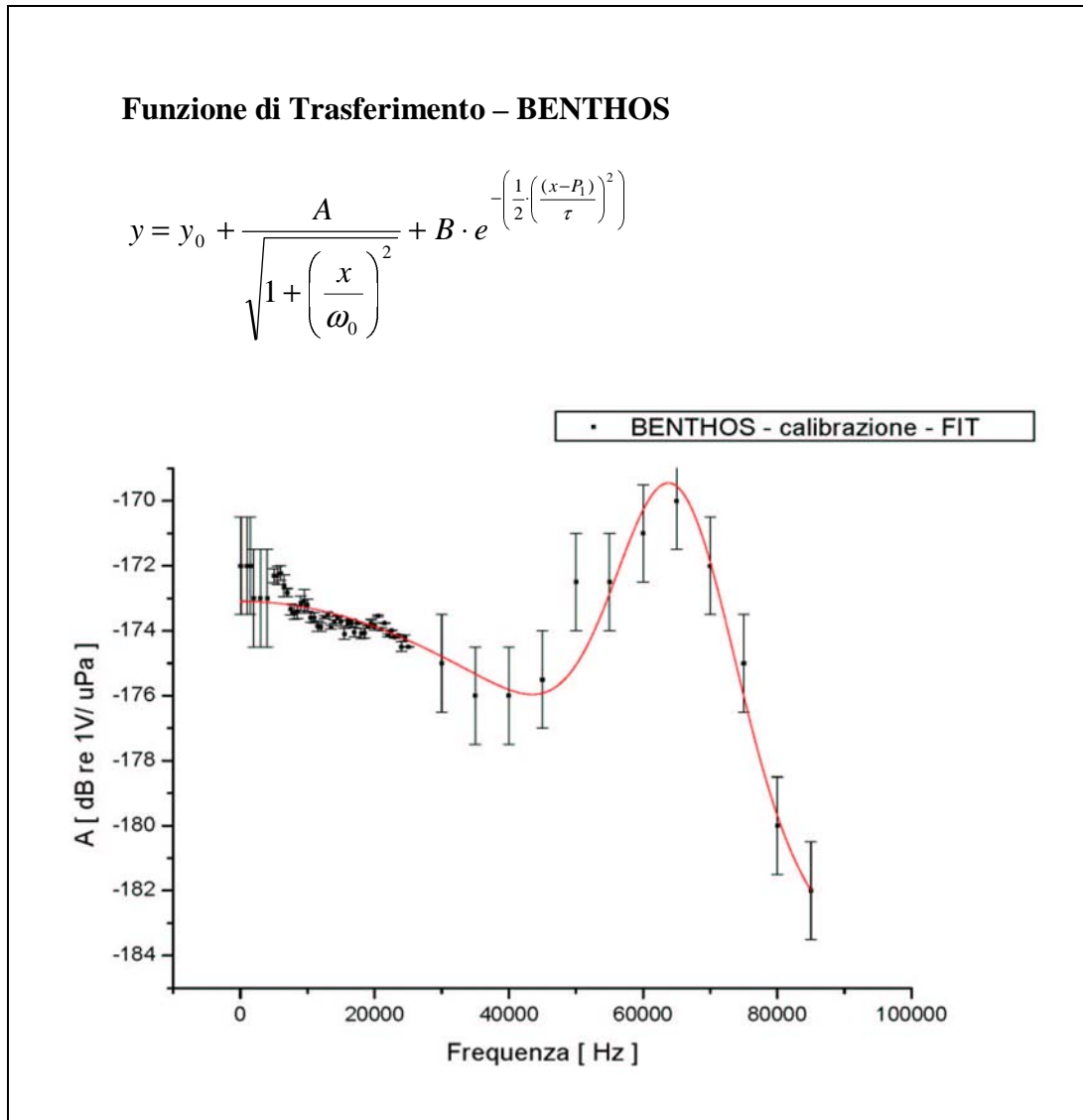


Figura 5.12 Funzione di Trasferimento – idrofono BENTHOS

Il modello del passa-basso è stato utilizzato anche per rappresentare i dati dell'idrofono RESON 4042, con la differenza che in questo caso si considerano due gaussiane, in modo da tenere conto anche dell'attenuazione in corrispondenza del valore 7.5KHz.

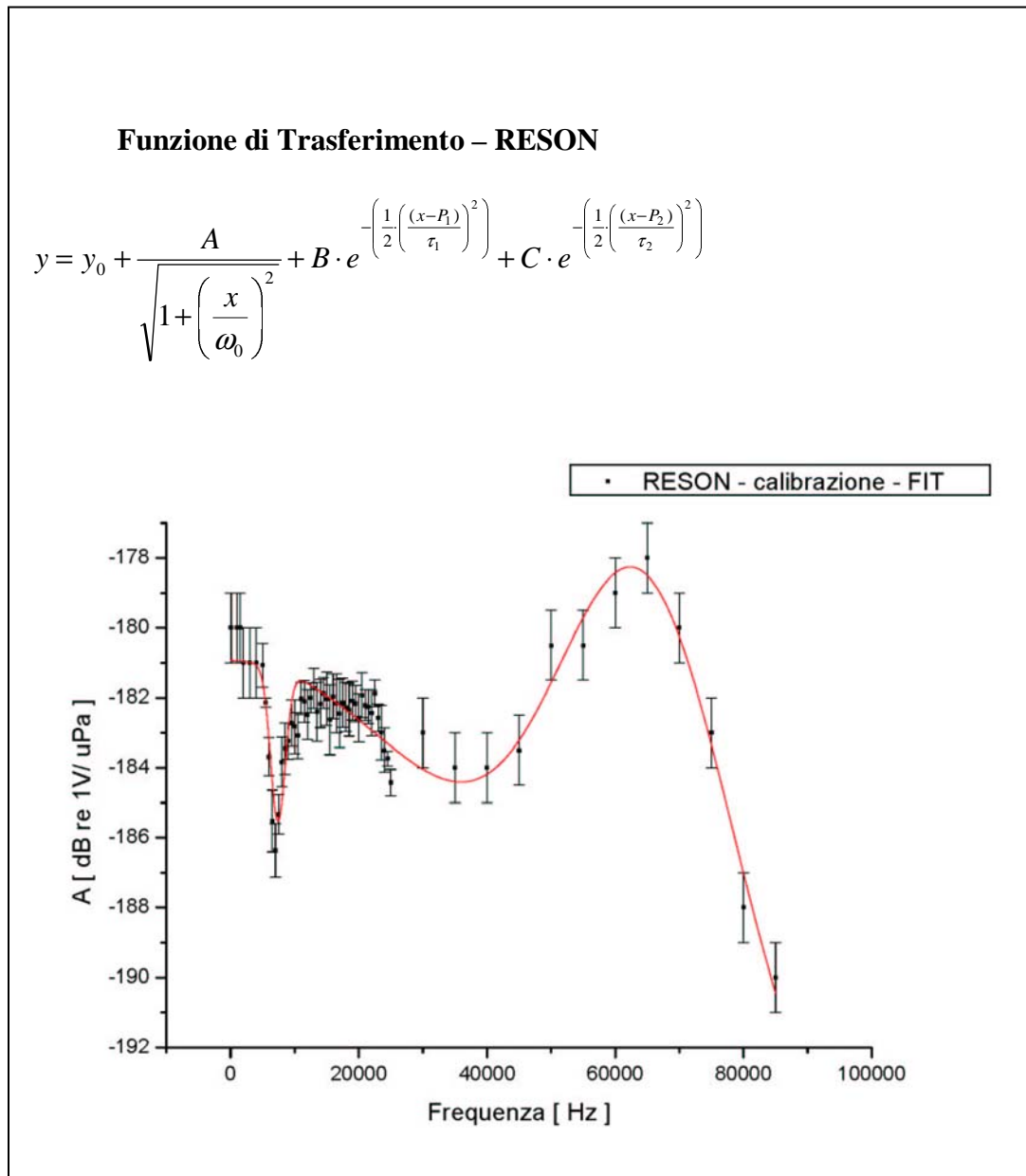


Figura 5.16 **Funzione di Trasferimento – idrofono RESON**

I risultati delle Figure 5.15 e 5.16 saranno ripresi, nel Capitolo 6, al momento di affrontare l'analisi in frequenza del segnale acustico prodotto da interazione di protoni in acqua.