

SPEAKER WORKSHOP

misure acustiche in casa

parte II

di Claudio Negro

Speaker Workshop usa il segnale MLS per le misure d'impedenza e curve di fitting per l'estrazione dei parametri di Thiele/Small. Una comparazione con MLSSA ha mostrato la bontà dei valori ottenuti.

Nella prima puntata abbiamo visto come collegare l'hardware e come calibrare Speaker Workshop (SW per brevità) per le misure d'impedenza; in questa seconda puntata vedremo come ottenere i parametri di Thiele e Small del woofer Focal 7K4412 attraverso la misurazione della sua curva d'impedenza. Per prima cosa bisogna rodare l'altoparlante, se nuovo, per alcune ore: si possono avere variazioni del 25% tra i parametri di un driver rodato ed uno non rodato! Potete usare il generatore di segnali di Speaker Workshop, oppure collegare l'altoparlante all'impianto stereo usando musica ricca di basse frequenze o meglio ancora usare un CD con frequenze campione: personalmente uso un segnale sweep da 10 a 100 Hz generato da SW. Ovviamente il segnale da mandare all'altoparlante durante il rodaggio deve essere amplificato, nel caso usiate la scheda audio per generarlo. Per diminuire il fastidio causato dal suono emesso dai driver durante il rodaggio, potete disporli l'uno di faccia all'altro e collegare uno dei due in controfase in modo da diminuire il volume sonoro generato. Intanto che il Focal si roda, dobbiamo pensare a come fissarlo durante la misurazione: bisogna prevenire vibrazioni dell'altoparlante e lasciare che sia la sola membrana a muoversi! Uno degli errori più comuni è sottostimare la necessità sia di un buon fissaggio del driver da misurare che quella di collocarlo lontano da

superfici riflettenti, pena un'erata misurazione; con qualche pezzo di legno si può facilmente costruire una base, oppure si può usare una morsa da banco come fanno in Vifa, che mantiene l'altoparlante in verticale rispetto al pavimento. Come regola generale, prima di iniziare la misurazione, è consigliabile far suonare l'altoparlante per un trenta minuti con la stessa procedura che avete usato per il rodaggio, poi aspettare qualche minuto per permettere alla temperatura della bobina mobile di stabilizzarsi. Per sincerarsi di questo, occorre misurare la R_e del nostro altoparlante subito dopo il "riscaldamento", usando un buon tester adatto alla misurazione di bassi valori di resistenza; poi ad intervalli regolari di qualche minuto si ricontrolla tale valore: inizialmente la R_e scenderà abbastanza velocemente per poi variare molto di meno. A quel punto passiamo alla misura dell'impedenza.

Collegiamo il cavo impedenza con la resistenza di riferimento (11,15 ohm) e richiamiamo (con Quickmix (1)) il settaggio di volume che abbiamo scelto nella prima parte del tutorial e, se usiamo un amplificatore, regoliamone il volume in modo da avere la tensione desiderata (compresa tra 0,2-0,5 Vrms) facendo riprodurre a SW una sinusoide test. Controlliamo poi le impostazioni di Speaker Workshop per assicurarci che tutto sia corretto: OPZIONI/PREFERENZE/MISURAZIONI e verifichiamo che il Campionamento (S/R) sia quello prescelto durante la fase di setup e che le Dimensioni siano

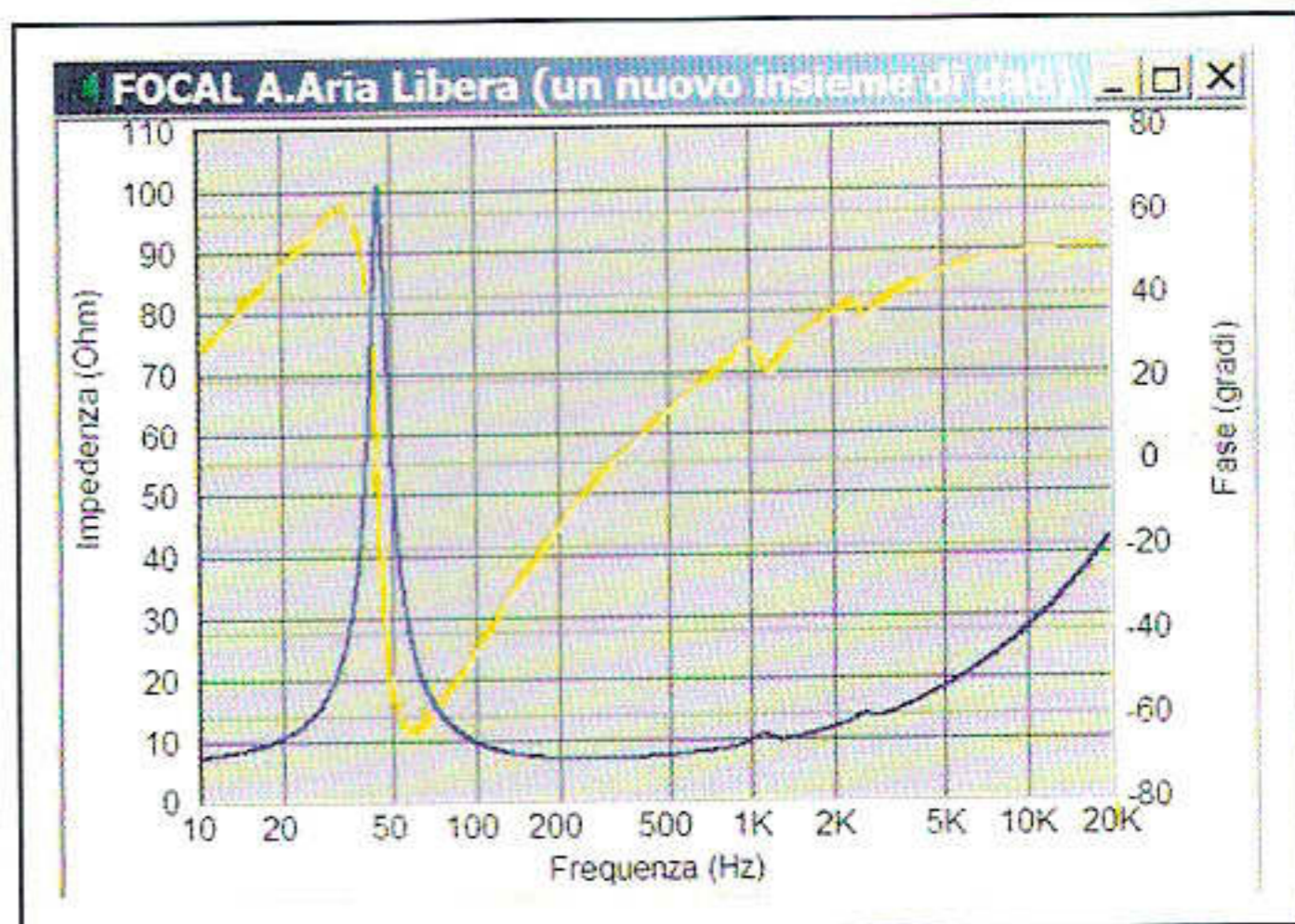


Fig. 1 - L'impedenza del Focal misurata con Speaker Workshop.

a 131k; aumentiamo il Numero Ripetizioni a 5 o più in modo da aumentare l'affidabilità dei risultati: così facendo il tempo di esecuzione è più lungo ma si diminuisce il rumore. La scelta del S/R è importante, visto che definisce il range di misurazione; usando 48k Hz la misurazione andrà fino a 24k Hz, mentre la risoluzione della misura è definita dal valore delle Dimensioni. Con 48k Hz

e 131k di risoluzione, avremo una misura da 0,37 a 24k Hz +/- 0.37 Hz, più che sufficiente nella maggioranza dei casi. Se ci aspettiamo di dover misurare un driver a bassa F_s ed alto Q_{ms} (quindi con un picco nella misura d'impedenza stretto in frequenza ed elevato come modulo), dobbiamo fare in modo che alla frequenza di risonanza la risoluzione sia almeno sufficiente altrimenti,

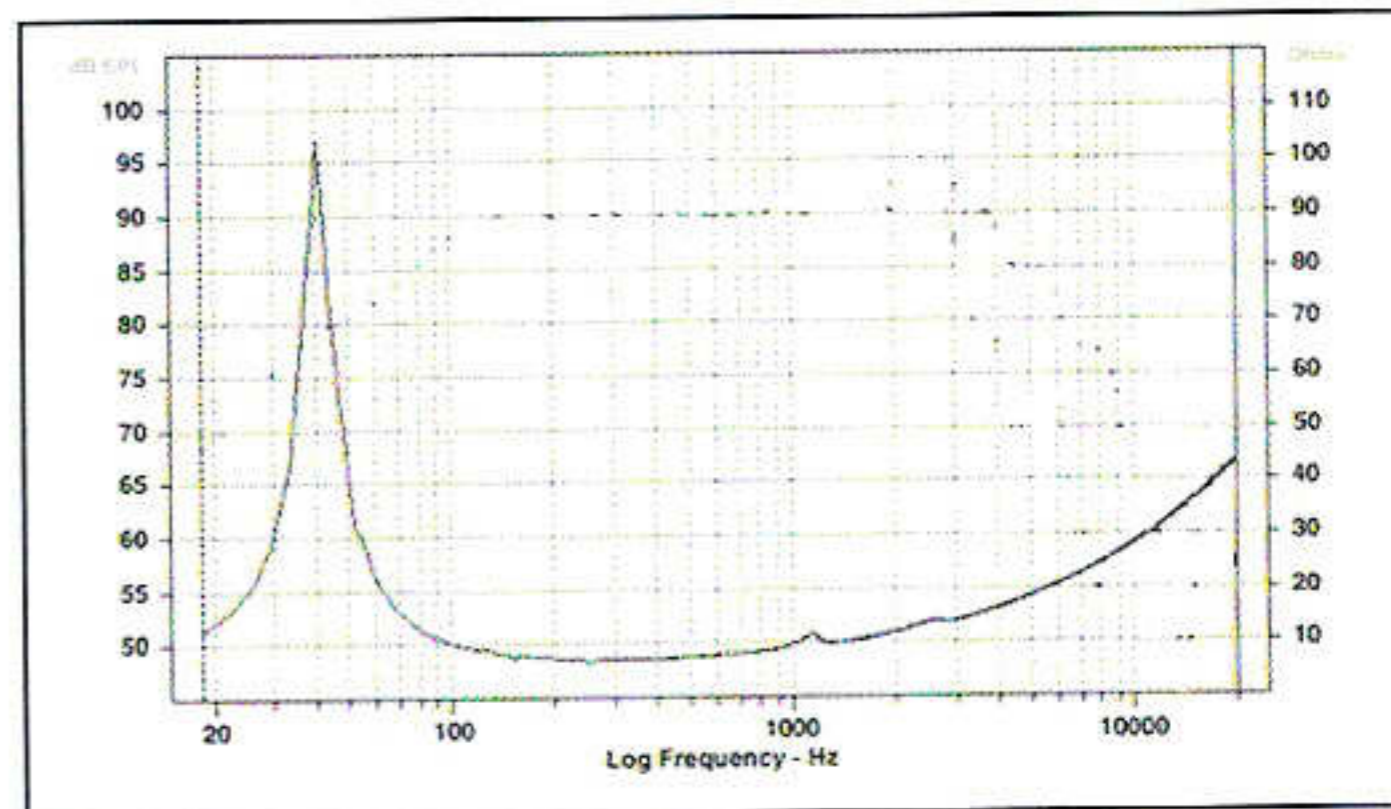


Fig. 2 - L'impedenza fornita dalla Focal.

1) <http://www.prodtechpart.co.uk/quickmix/index.html>.



Fig. 3 - Come definire il range più opportuno da utilizzare per l'analisi.

all'atto pratico della misura, il picco viene interpolato fra due punti troppo distanti e quindi limato o addirittura ignorato: in questi casi si possono aumentare le *Dimensioni* a 256k ed anche diminuire il S/R, ricordandosi di aumentare il *Numero Ripetizioni* visto che SW è molto sensibile al rumore e le alte risoluzioni implicano di per sé un maggior rumore oltre che tempi di misura più lunghi. Per contro, se misuriamo un driver con la *Fs* elevata e il *Qms* basso (quindi largo in frequenza e basso come modulo), non è necessario impostare una alta risoluzione, evitando così problemi di rumore e diminuendo i tempi di misurazione dato che è possibile, in questi casi, diminuire il *Numero Ripetizioni*. **Creiamo ora un nuovo altoparlante** andando su RISORSE/NUOVO/ALTOPARLANTE, che io ho chiamato "FOCAL A"; diamo un doppio click su "FOCAL A" poi MISURA/IMPEDENZA IN ARIA LIBERA (oppure usate le icone) e sentiremo un fruscio uscire dal woofer (segnale MLS) e, dopo alcuni istanti, nella struttura ad albero vedremo un nuovo file che corrisponde alla misurazione dell'impedenza: "FOCAL A.Aria Libera". Doppio click sul file e apparirà il grafico dell'impedenza (Fig. 1) che probabilmente non sarà visibilissimo, quindi dovremo migliorarne l'aspetto dandogli un doppio click con il mouse e aggiustando i valori degli assi X, Y ed Y2; ricordiamoci poi di cliccare nel grafico col tasto destro e selezionare FORMATO GRAFICO PREDEFINITO: in questo modo abbiamo salvato come valori di default le proprietà di visualizzazione dei grafici d'impedenza. Non dimentichiamoci che

possiamo ingrandire il grafico in toto o in una sua parte specifica, usando le icone che raffigurano la lente d'ingrandimento o selezionando con il mouse l'area che vogliamo zoomare. Comparando i due grafici dell'impedenza,

quello misurato da SW e quello fornito dalla Focal (Fig. 2), si nota la similitudine tra i due (guardate i due piccoli picchi a circa 1090 e 2490 Hz) che depone a favore di Speaker Workshop; la misurazione è stata fatta alla massima risoluzione, 256k, ed è quello che io chiamo un grafico pulito, senza cioè picchi spuri o rumore. Vediamo ora come **calcolare i parametri di Thiele e Small**, per i quali SW usa la tecnica del *Curve Fitting* e non l'oramai datato calcolo per tre punti: diamo un doppio click su "FOCAL A" e si apre, se non è già aperta, una finestra relativa ai parametri del driver; click nella finestra con il tasto destro del mouse e selezioniamo PROPRIETÀ e poi DATI, dove nella casella *Usa questa res. DC* immettiamo il valore della resistenza in continua dell'altoparlante, *Re*, precedentemente misurato con il nostro fido tester, e spuntiamone la casella; nella casella *Impedenza in aria libera* vedremo il nome del file generato dalla misurazione dell'impedenza (FOCAL A.Aria Libera). Sempre in questa finestra selezioniamo PARAMETRI e nella sezione FORNITI digitiamo i cinque valori richiesti desunti dalle specifiche del produttore; attualmente SW non usa i primi quattro di questi parametri ma è bene immetterli perché risulteranno visibili nella scheda dell'altoparlante. Le unità di misura, quando di colore blu, possono essere cambiate semplicemente cliccandoci sopra; al termine diamo OK. Facciamo ora calcolare i parametri di T/S da SW aprendo il menu ALTOPARLANTE/STIMA PARAMETRI... Se la curva d'impedenza è "pulita" cioè priva di picchi non propri dell'altopar-

lante e senza rumore (come quella che ho misurato), possiamo marcare *Usa l'intero insieme*; in caso contrario selezioniamo *Usa l'Insieme* definendo un range di frequenze in cui la curva è pulita (Fig. 3). Poi diamo OK, e dopo qualche secondo ci appare un messaggio di cui non dobbiamo preoccuparci: saranno calcolati tutti i valori di T/S ad eccezione del *Vas*, del quale ci occuperemo tra poco; infine potremo vedere la finestra con i parametri T/S (Fig. 4). Riguardo ai valori di induttanza (*Le-L1*) che SW calcola, bisogna dire che per la regione induttiva dell'impedenza il programma usa un modello di driver tutto suo (in pratica *Le* in serie con il parallelo *L1-R1*), quindi è normale che il valore di *Le* calcolato da SW non corrisponda a quello che trovate nelle caratteristiche fornite dal produttore dell'altopar-

Naturalmente bisogna ricordare che sia la *Fs* che i *Q* sono dipendenti dal livello del segnale usato, nella fattispecie ad un aumento del segnale corrisponde una loro diminuzione, quindi prima di poter comparare due sistemi di misura bisogna accertarsi almeno della uguaglianza del livello usato. A questo proposito D'Appolito, nel suo *Testing Loudspeakers*, compara i parametri di Thiele e Small di un woofer da 8" ottenuti sia con la Clio che con MLSSA, ottenendo valori di *Fs* e dei *Q* più bassi con il sistema dell'Audiomatica proprio perché il segnale applicato al driver era di 0,775 Vrms sinusoidale contro i 0,024 V MLS della scheda americana. Solo equiparando i livelli si ottenevano valori di *Fs* e dei *Q* simili, mentre la differenza tra il *Vas* e la *Mms* aumentava. In conclusione quello che dobbiamo tenere

FOCAL A (un nuovo altoparlante)			
Altoparlante: FOCAL A			
Descrizione:			
Risonanza (Fs)	44,938 Hz	Area Pistone (Sd)	176,700 cm ²
Complanza (Vas)	1000,000 litri	Massima Escursione (Xmax)	0,350 cm
Q totale (Qts)	0,419	Sensibilità (W/m)	90,700 W/m
Q meccanico (Qms)	0,996	Massima potenza d'ingresso (Pe)	125,000 W
Q elettrico (Qes)	0,446	Fattore di forza (BL)	8,600
Induttanza (Le)	0,158 mH	Volume cassa chiusa	1000,000 litri
Induttanza (L1)	0,298 mH	Massa aggiunta	1,000 g
Resistenza Serie (R1)	32,833 Ohm	Re fornita dall'utente: Si	
Resistenza DC (Re)	6,060 Ohm	Usa metodo della massa aggiunta: No	

Fig. 4 - I parametri T/S calcolati da Speaker Workshop.

lante, che a sua volta dovrebbe specificare la sua metodologia di misura, cosa che spesso non accade. Notate che nella directory appare un nuovo file, "FOCAL A.Stima", che è appunto l'impedenza calcolata sui parametri stimati. Apriamolo e confrontiamolo con "FOCAL A.Aria Libera": se i due grafici sono simili significa che la stima fatta è buona. Volendo possiamo vedere due o più grafici nella stessa finestra, in modo da facilitarne la comparazione: basta cliccare con il tasto destro del mouse nel grafico e scegliere AGGIUNGI, poi scegliere il file che si desidera e il gioco è fatto.

Se compariamo i valori misurati da SW con quelli forniti dal costruttore, sicuramente troveremo delle differenze, a volte anche grandi: nel caso del Focal abbiamo variazioni dell'11% nella frequenza di risonanza e del 27% nel *Qts*.

a mente è che i parametri di T/S sono intesi per piccoli segnali: per i grandi segnali ci sono altre metodologie (2), ma questa è un'altra storia!

Bene, questa parte è quasi finita. "Come quasi", mi direte, "abbiamo tutti i valori di T/S!". Beh, in effetti ne abbiamo solo la metà: mancano quelli del secondo Focal. Così come abbiamo trovato differenze tra i dati forniti dal costruttore e quelli misurati, troveremo differenze anche tra i due altoparlanti che andremo ad usare, anche se sono venduti in coppie selezionate come i Focal. Quindi creiamo un nuovo altoparlante come abbiamo fatto in precedenza, solo che lo chiameremo Focal B, e ripetiamo la procedura dall'inizio.

MISURAZIONE DEL VAS

Abbiamo calcolato i parametri di Thiele e Small tramite la curva d'impedenza ad eccezio-

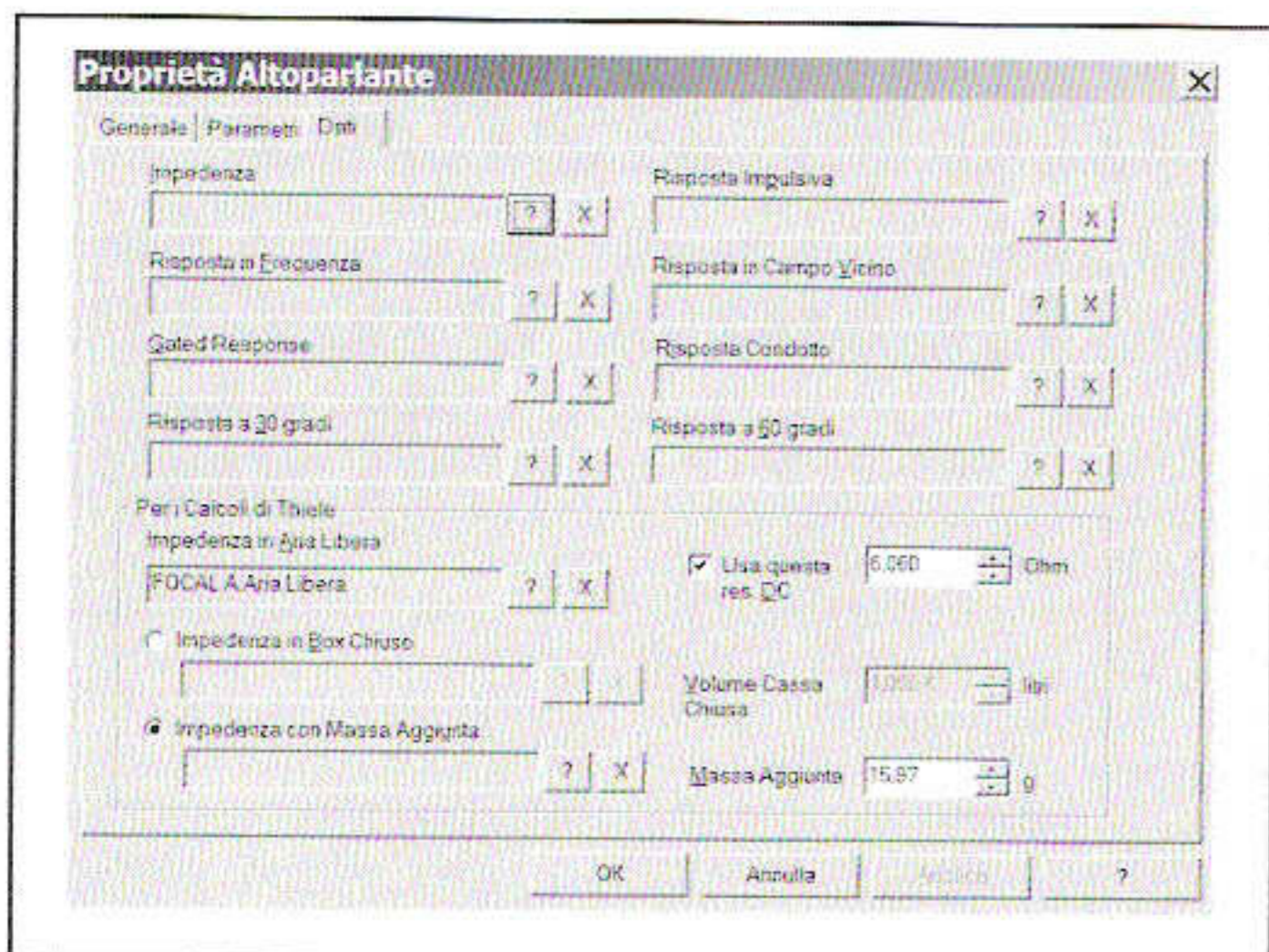


Fig. 5 - La finestra di dialogo per l'immissione della massa aggiunta.

ne del *Volume Equivalente alla Cedevolezza* o *Vas*; per ottenere questo dato bisogna misurare l'impedenza dell'altoparlante o in un *box chiuso* o con una *massa aggiunta*. Il primo sistema, in *box chiuso*, richiede la costruzione di una cassa con volume noto, circa la metà o meno del *Vas*, e priva di perdite (pareti rigide, massima tenuta stagna sia della cassa che dell'altoparlante e mancanza di assorbente); il secondo metodo, con *massa aggiunta*, richiede l'uso di un peso amagnetico da collocare sul cono del driver sotto test, per abbassarne la *Fs*. La misura del *Vas* è una delle più difficili per la sua dipendenza da temperatura e densità atmosferica, quindi è variabile nel tempo. Tuttavia non è necessario avere un'alta precisione di questo valore: Joseph D'Appolito (3) afferma che una variazione del 25% del *Vas* risulta in una variazione inferiore a +/-1 dB nella risposta di un sistema bass reflex accordato B_1 o QB_1 ; in un sistema in sospensione pneumatica con $\alpha > 3$ e $Q_{tc} < 1.1$, la variazione è ancora minore. **Il metodo con box chiuso**, porta ad errori se esistono perdite tra driver e box, o anche attraverso la sospensione e la cupola parapolvere; detto metodo misura direttamente il *Vas*. **Il metodo con massa aggiunta**, per contro, si fonda sull'assunto che la variazione di massa mobile non implichi una variazione della cedevolezza delle sospensioni (C_{ms}): tale

metodo, quindi, risente delle non linearità della sospensione, per cui si cerca di farlo con bassi voltaggi e bassi pesi; risente anche di un errato calcolo della S_d visto che nella formula del *Vas* tale grandezza compare al quadrato. Il fatto stesso di applicare un peso sposta la posizione del cono a riposo, cosa che può causare errori di misurazione: per ovviare a ciò bisogna alimentare l'altoparlante, con la massa aggiunta posizionata, con un segnale sinusoidale di frequenza uguale alla sua *Fs* per un minuto circa, in modo da riportare il cono in posizione di riposo; poi si fa la misurazione. Il metodo con massa aggiunta calcola il *Vas* attraverso la M_{ms} (massa meccanica in movimento) e la C_{ms} (compliance meccanica). Sempre D'Appolito riportava una variazione del 4% dello stesso altoparlante misurato con i due metodi, a riprova della variabilità della misurazione. **Il secondo metodo**, quello della massa aggiunta, sarà qui usato per la determinazione del *Vas*. Per prima cosa dobbiamo procurarci un peso: possiamo usare il **Blu Tack**, una sorta di plastilina che troverete in cartoleria o nel club di FdS; oppure usiamo l'Euro o altre monete che siano amagnetiche (basta avvicinarle al magnete dell'altoparlante per capirlo). Qualunque sia il peso che useremo, dobbiamo saperne con precisione la massa misurandola con una bilancia

elettronica tipo quelle usate da farmacisti e gioiellieri; io vi posso dire che la moneta da 1 euro pesa 7,50 g mentre quella da 2 euro pesa 8,47 g incluso il bi-adesivo. D'accordo, ma quanto peso dobbiamo usare? Abbastanza per ottenere una diminuzione maggiore del 25% (3) della frequenza di risonanza con massa aggiunta rispetto a quella in aria libera, cioè misurata senza peso aggiunto; in caso contrario bisogna aumentare il peso fino al raggiungimento di detta variazione. Potete partire da un peso uguale ad 1/3 della M_{ms} ed aumentarlo quanto necessario, tenendo presente, però, che un peso troppo alto farebbe cadere l'assunto che la variazione di un parametro (massa) non cambi l'altro (cedevolezza): come vedete è una situazione di compromesso, dove bisogna aumentare il peso per ottenere una variazione del 25% della *Fs*, ma al tempo stesso non si deve eccedere nel peso pena una variazione della C_{ms} e quindi caduta dei presupposti. Se usiamo il Blu Tack lo modelleremo a forma di ciambella mentre se usiamo le monete le collocheremo simmetricamente sul cono vicino alla giunzione con il parapolvere, in modo da distribuire uniformemente il peso e non incorrere nel suo disallineamento. Ricordiamoci di usare il bi-adesivo per fissare le monete! L'altoparlante deve essere misurato in posizione orizzontale a causa dei pesi e

comunque su un piedistallo in modo da minimizzare le riflessioni causate dalla vicinanza di pareti o quant'altro, sia davanti che dietro il driver. Il limite di questo sistema è proprio da ricercare nel peso: con woofer di diametro superiore ai 30 cm e con *Fs* inferiore ai 30 Hz, può risultare difficile riuscire ad abbassare la *Fs* del 25% senza usare pesi impossibili; inoltre se la *Fs* è già di per sé molto bassa, abbassandola ulteriormente andremo a far calcolare i parametri a SW in una regione di spettro in cui può esserci maggiore rumore. In questi casi bisogna usare il metodo del box chiuso che invece alza la *Fs*. **Torniamo a Speaker Workshop**: con i pesi collocati e i cavi collegati come nella precedente misurazione (impedenza), doppio click su "FOCAL A" e si apre, se non è già aperta, una finestra relativa ai parametri del driver; click nella finestra con il tasto destro del mouse e selezioniamo PROPRIETÀ e poi DATI; spuntiamo la casella *Impedenza con Massa Aggiunta* e scriviamo il peso che useremo (se usate il sistema del box chiuso spuntate quella casella e scrivete il volume del box) (Fig. 5). Chiudiamo la finestra cliccando su OK, poi menù MISURA/IMPEDENZA CON MASSA AGGIUNTA; sentiremo il solito fruscio uscire dal Focal e dopo qualche secondo noteremo un nuovo file nella directory: "FOCAL A.Massa Aggiunta". Apriamolo (Fig. 6) e controllia-

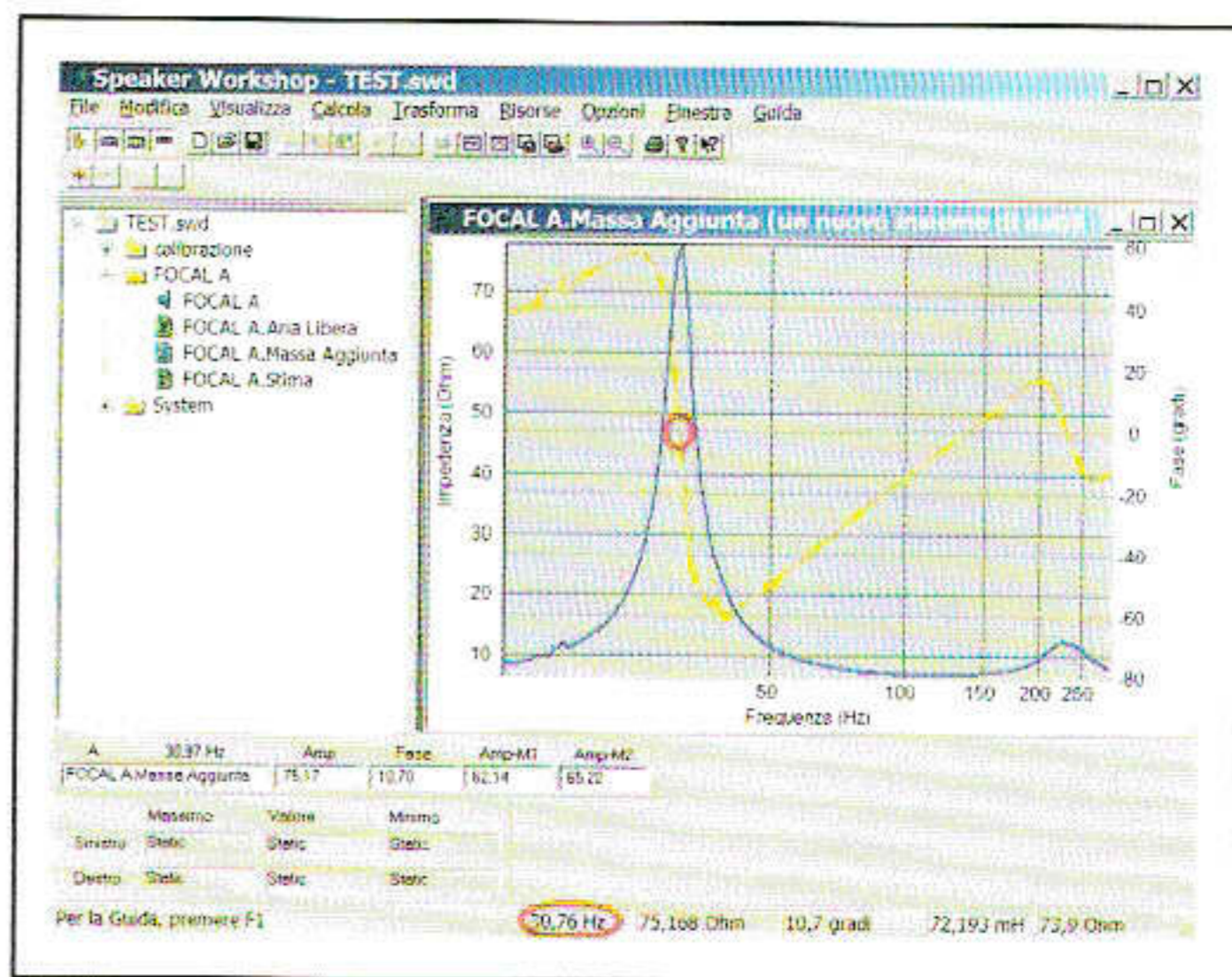


Fig. 6 - L'impedenza del Focal con la massa aggiunta.

3) Joseph D'Appolito: "Testing loudspeakers".

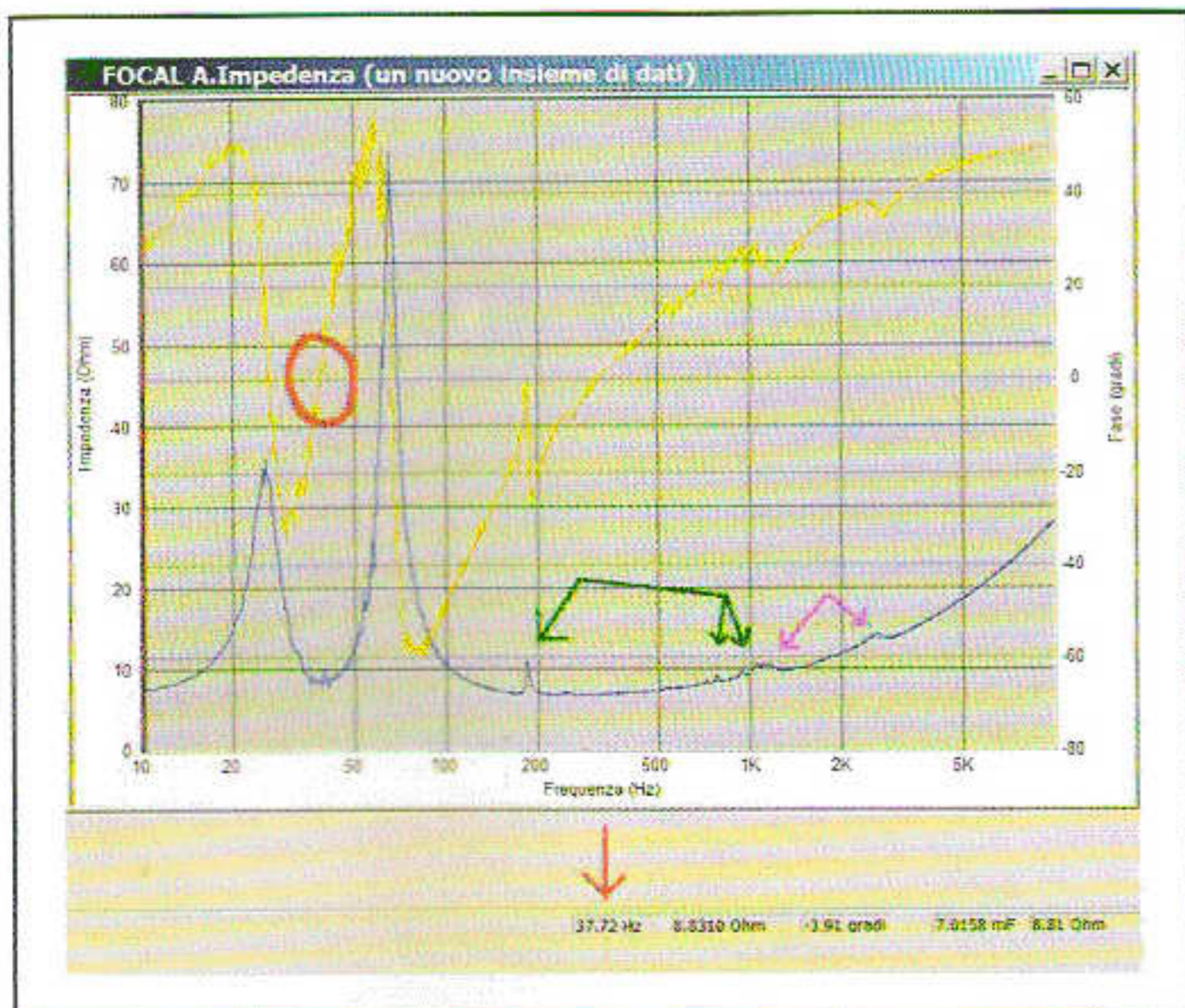


Fig. 7 - L'impedenza del Focal montato in cassa.

mo che la nuova F_s sia inferiore ad almeno il 25% della F_s in aria libera, ma senza eccedere! Per saperne il valore guardiamo il modulo della fase (linea gialla) nel punto in cui passa per lo zero, che in teoria corrisponde al picco del modulo dell'impedenza; se nel menù VISUALIZZA è spuntata la BARRA DI STATO (che è visibile lungo la cornice in basso a destra di SW), possiamo leggere i valori semplicemente passando il cursore del mouse sul grafico; ingrandendo l'area d'interesse si ottiene una più facile lettura dei valori. Se la differenza è minore del 25%, dobbiamo aumentare il peso e ripetere la misurazione. Ora non resta che far calcolare a SW il V_{as} aprendo il menù ALTOPARLANTE/ STIMA PARAMETRI; se la curva d'impedenza è "pulita" cioè priva di picchi non propri dell'altoparlante e senza rumore, possiamo marcare Usa l'intero insieme, in caso contrario selezioniamo Usa l'insieme definendo un range di frequenze dove la curva è pulita. In pratica ripetiamo gli stessi passi fatti precedentemente per la misurazione degli altri parametri di T/S, solo che questa volta non ci apparirà la finestra di errore per il calcolo del volume acustico, mentre la finestra con i dati del Focal ci mostrerà anche il V_{as} .

Abbiamo terminato anche questa fase, che potreste approfondire andando a verificare i dati misurati e calcolando alcuni altri parametri, attraverso un file formato Excel o un utilissimo programma, scritto da Bruno Dalle Carbonare, il quale, oltre a calcolare i parametri col metodo per tre punti, ci dice se abbiamo commesso qualche errore nella misurazione, come spiegato nel mio sito (4).

IMPEDENZA DEL DIFFUSORE

Una volta che abbiamo il diffusore pronto, possiamo misurare l'impedenza del woofer montato in cassa, in modo da sapere la sua frequenza di accordo nonché l'interazione mobile-altoparlante. Useremo gli stessi collegamenti usati in precedenza per la misurazione dell'impedenza in aria con la sola differenza che al cavo DUT collegheremo il woofer in cassa; i settaggi di volume sono quelli noti e finora usati e lo stesso dicasi per la frequenza di campionamento: insomma, usiamo le stesse impostazioni usate durante la misurazione dell'impedenza in aria.

Doppio click su "FOCAL A" e poi MISURA/ IMPEDENZA e aspettiamo che termini la misurazione; poi apriamo il nuovo file creato, "FOCAL

A. Impedenza" di cui ci apparirà il grafico. Il sistema usato in questo esempio è un diffusore reflex a torre (misure interne 959 x 188 x 218 mm) con due porte di accordo e senza assorbente acustico all'interno (Fig. 7). La curva dell'impedenza di un altoparlante montato in **cassa completamente chiusa** presenta un picco come avviene per l'altoparlante in aria libera, solo che questo picco non è più posto alla frequenza di risonanza (F_s) ma si trova alla **frequenza di risonanza del sistema chiuso** (F_c), la quale risulta essere sempre maggiore della F_s e inversamente proporzionale al volume della cassa. In una **cassa bass reflex** la curva dell'impedenza presenta due picchi, uno (F_l) posto ad una frequenza inferiore di F_s , l'altro (F_h) ad una frequenza superiore di F_s ; tra i due picchi c'è un avvallamento il cui valore inferiore (*minimo*) corrisponde alla **frequenza di accordo del sistema reflex** (F_b); volendo essere più precisi dobbiamo dedurre la frequenza di accordo del sistema dall'argomento dell'impedenza: guardando la Fig. 7, che si riferisce ad un sistema reflex, possiamo subito sapere qual è la F_b posizionando il cursore del mouse nel punto in cui la fase (linea gialla) assume valore zero tra i due picchi (cerchio rosso) e leggerne il valore nella BARRA DI STATO (freccia rossa); la fase assume valore uguale a zero in tre punti che sono i due picchi dell'impedenza ed il *minimo* tra essi. Un altro metodo (5) per calcolare la F_b è quello di chiudere ermeticamente il condotto d'accordo con una tavola di legno e relativa guarnizione, e misurare la curva d'impedenza; da questa leggete il valore della F_c e applicate la formula: $F_b = (F_l^2 + F_h^2 - F_c^2)^{1/2}$. Vi rimando al mio sito per scaricare un foglio Excel che calcola i parametri di Thiele/Small in cassa, compreso il Q del box, partendo da detto metodo. Conoscendo la F_b sappiamo se l'accordo scelto a tavolino

è stato rispettato o meno, e comunque variando la lunghezza dei condotti e ripetendo la misurazione possiamo raggiungere la frequenza di accordo desiderata; ricordatevi che a parità di volume della cassa e di diametro della porta di accordo, un tubo più lungo diminuisce la F_b .

Vediamo ora **cosa sono i vari picchi** che vediamo nel modulo dell'impedenza (linea blu): quelli evidenziati dalle frecce verdi sono causati dalle onde stazionarie del mobile; infatti se applichiamo la formula $F = 345 / 2d$ dove per d si intende una delle dimensioni della cassa espressa in metri, avremo $F_1 = 345 / 1,92 = 180$ Hz; ripetiamo il calcolo per le altre due dimensioni ed avremo $F_2 = 917$ Hz, $F_3 = 791$ Hz. Ecco quindi come il grafico dell'impedenza ci viene in aiuto a capire come il mobile interagisce con il driver, e ci aiuta a verificare se le contromisure prese (assorbente, rinforzi etc.) sono riuscite a diminuire o ad annullare il problema (perché le risonanze create dalla cassa sono un problema!). I due altri picchi (frecce fucsia) sono propri del Focal come si può notare dalla curva fornita dalla casa (Fig. 2), quindi dobbiamo tenerceli. La risposta dell'impedenza del diffusore dovrebbe essere ripetuta a cassa completata, cioè con tutti gli altoparlanti e i filtri crossover collegati, per rendersi conto del carico offerto all'amplificatore e regolarsi in merito.

CONCLUSIONI

Anche questa seconda parte è giunta al termine, sicuramente con maggior facilità rispetto alla prima, quella più delicata del setup di Speaker Workshop. Abbiamo visto come misurare l'impedenza degli altoparlanti in aria, calcolarne i parametri di T/S, verificare la frequenza di accordo del diffusore e conoscere le risonanze del mobile, tutto grazie a pochi click di mouse. La terza ed ultima parte la dedicheremo alle misure acustiche.

4) <http://planeta.terra.com.br/educacao/claudio negro/>

5) J.E. Benson: "Theory and design of loudspeaker enclosures" in *Amalgamated Wireless* vol. 14 (11/1972).