

# Coatta

## *Studio e Progettazione di un Diffusore Monitor Coassiale per Musica Elettronica*

---

Tesi di Laurea triennale in **Tecnico del Suono**

a cura di **Francesco Raja**

Relatore **Stefano Silvestri**



Conservatorio di Musica  
Giuseppe Martucci  
Salerno

## Indice

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>I.</b>   | <b>Introduzione.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>II.</b>  | <b>Brano elettroacustico algoritmico.....</b>                           | <b>2</b>  |
| <b>1.</b>   | <b>Note di esecuzione.....</b>  | <b>3</b>  |
|             | Scheda tecnica.....   | 3         |
|             | Istruzioni per l'utilizzo della Patch.....                              | 3         |
|             | MIDI Controllers.....   | 4         |
| <b>2.</b>   | <b>Stanze di generazione.....</b>                                       | <b>6</b>  |
|             | Stanza A – Armonizzatore di bande passanti costruito su spettro reale.. | 6         |
|             | Stanza B – Rhythm Sequencer.....  | 7         |
|             | Stanza C – Manipolazione di “Ricordo di infanzia” di Nino Rota.....     | 8         |
|             | Stanza D – Electronic flouting clusters.....                            | 10        |
| <b>3.</b>   | <b>Gestione del caos.....</b>   | <b>12</b> |
|             | Sistemi Basati su modelli fisici/geometrici.....                        | 12        |
|             | Sistemi probabilistici.....   | 12        |
|             | Spazializzazione.....   | 13        |
| <b>III.</b> | <b>Progettazione di Coatta.....</b>                                     | <b>17</b> |
|             | Software e hardware per la progettazione.....                           | 18        |
|             | Cassa acustica coassiale.....   | 19        |
| <b>1.</b>   | <b>Scelta dei componenti.....</b>                                       | <b>21</b> |
|             | Analisi e simulazione delle risposte in frequenza.....                  | 22        |
| <b>2.</b>   | <b>Progettazione del cabinet.....</b>                                   | <b>26</b> |
|             | Storia della progettazione dei cabinet per cassa elettroacustica.....   | 26        |
|             | La cassa chiusa.....  | 28        |
|             | Sistema Bass-Reflex.....  | 30        |
|             | Simulazione.....  | 32        |
| <b>3.</b>   | <b>Progettazione del Filtro Crossover.....</b>                          | <b>39</b> |
|             | Filtro crossover.....   | 42        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. Costruzione prototipo .....</b>                              | <b>43</b> |
| Cabinet .....  | 43        |
| Filtro crossover.....  | 46        |
| Rivestimento interno .....   | 47        |
| Componenti interni.....  | 48        |
| <b>IV. A.L.V.O. – Ambiente di Linguaggi e Voci Originari .....</b> | <b>52</b> |

## I. Introduzione

La realizzazione di un padiglione è nata da un'idea condivisa con il mio collega Emanuele Sorgente. Insieme, ci siamo spesso chiesti perché progetti visionari come il *Padiglione Philips* non abbiano trovato continuità nel corso della storia. Crediamo fortemente che, soprattutto per la musica elettroacustica, ma non solo, sia necessario creare nuovi spazi sonori capaci di avvicinare le persone a quell'esperienza immersiva. Progettare un padiglione richiede competenze trasversali, non solo nell'acustica degli spazi, ma anche nell'architettura, nell'ingegneria del suono, nella valorizzazione dei beni culturali, e in molte altre discipline. Per questo motivo, abbiamo deciso di suddividere il nostro lavoro: io mi concentrerò sui dispositivi di diffusione sonora del padiglione, ponendo particolare attenzione alla progettazione dei diffusori adibiti all'ascolto monitor nelle quattro stanze, affinché ogni spazio possa offrire un'esperienza sonora ottimale e coerente; l'elaborato di Sorgente riguarderà l'analisi di padiglioni e concert hall finalizzata alla comprensione dei corretti parametri acustici per la successiva progettazione del Padiglione stesso. Di fatto, la mia e quella di Sorgente sono due tesi complementari che argomentano le tematiche tecniche e filologiche per la realizzazione del Padiglione **A.L.V.O.** e del diffusore acustico **Coatta** ad-hoc per il Padiglione. Siamo consapevoli che il lavoro sognato è più grande di noi; quindi, abbiamo deciso di realizzare un nucleo di ciò che, chissà, un giorno potrebbe diventare realtà. Inoltre, questo nuovo spazio sonoro ospiterà l'esecuzione di un brano elettroacustico algoritmico, da noi composto e programmato con Max/MSP, intitolato "*Studio sull'imbroglione*", che verrà trattato nel capitolo successivo.

## II. Brano elettroacustico algoritmico

Il brano elettroacustico *Studio sull'imbroglia* nasce per avvicinare l'ascoltatore medio alla musica elettronica contemporanea, promuovendo un'esperienza interattiva e consapevole. Realizzata in Max/MSP, la composizione si sviluppa in due fasi principali: **preparazione** ed **esecuzione**, entrambe pensate per stimolare l'interazione attiva dell'ascoltatore e la variabilità dell'ascolto.

Nella fase di preparazione, della durata di cinque minuti, gli utenti si dividono nelle *Stanze di Preparazione* del *Padiglione Alvo* (pag. 52), ciascuna dotata di una patch digitale di controllo. In questi ambienti, gli utenti intervengono direttamente sul materiale sonoro, modificandone i parametri timbrici e ritmici tramite controller MIDI per definire la sonorità del brano. Parallelamente, influenzano inconsciamente parametri evolutivi del brano, come eventi, gesti e spazializzazione. Questa interazione consapevole e inconscia permette loro di contribuire al processo creativo, contribuendo a un'esperienza immersiva e dinamica.

Al termine della fase di preparazione, gli utenti si dirigono verso la *Sala d'Esecuzione* per la seconda fase: un'esecuzione di cinque minuti, durante la quale il materiale sonoro evolve autonomamente. La gestione algoritmica del caos, implementata per creare una costante variazione nei parametri sonori, garantisce che ogni esecuzione del brano risulti diversa, arricchita sia dall'intervento umano sia dall'imprevedibilità algoritmica. Questa scelta artistica enfatizza la variabilità dell'ascolto: come l'ascoltatore percepisce diversamente la stessa musica in base alla focalizzazione della propria attenzione, così in *Studio sull'imbroglia* l'esperienza è sempre nuova e imprevedibile, avvicinando il pubblico a un ascolto più consapevole.

## 1. Note di esecuzione

### Scheda tecnica

L'esecuzione richiede un sistema audio che si divide in due configurazioni: un sistema multicanale 4.0 per la *Sala d'Esecuzione* che ipotizza una successiva implementazione del sistema 4.1 (sia hardware che software), mentre per le *Stanze* è previsto un ascolto in monofonia con l'ausilio del diffusore *Coatta* (pag. 17).

Il sistema audio multicanale **4.0** è costituito da quattro altoparlanti disposti ai quattro angoli di una stanza, senza il canale dedicato ai bassi (subwoofer).

La configurazione consigliata è la seguente:

- Canale 1: Fronte sinistro (L)
- Canale 2: Fronte destro (R)
- Canale 3: Retro sinistro (Ls)
- Canale 4: Retro destro (Rs)

Il sistema multicanale **4.1** estende il concetto del 4.0 aggiungendo un quinto canale dedicato al subwoofer, che gestisce le basse frequenze.

- Canale 5: Subwoofer (LFE - Low-Frequency Effects)

Le *Stanze* necessitano di controllers MIDI<sup>1</sup> ad-hoc, collegati a quattro supporti PC da distribuire nelle Stanze, che comunicano con il PC della Sala d'Esecuzione via rete LAN con protocollo UDP<sup>2</sup>.

È necessario il caricamento delle cartelle specifiche e della cartella per le Stanze (es. "Stanza A") e di tutti i file nella Sala, e l'avviamento delle patch con il nome corrispondente ("Madre" è la patch della Sala).

### Istruzioni per l'utilizzo della Patch

Nel pannello di controllo principale sono presenti cinque pulsanti: **Play**, **Stop**, **Record**, **Madre** e **Preset**.

### ***Modalità Record e Madre***

La patch si divide in due modalità principali: *Record* e *Madre*.

La modalità *Record* abilita i controlli delle Stanze, permettendo all'utente di interagire con il materiale.

La modalità *Madre* raccoglie tutti i dati generati nelle Stanze (audio e dati), avviando tutti i processi di spazializzazione e di gestione degli eventi e dei gesti discussi nei paragrafi precedenti, controllando le patch delle Stanze.

### ***Fase di Test (Preset)***

Tramite un pulsante di *Preset* (selezionabile solamente in modalità *Record*) è possibile bypassare la modalità *Record* per eventuali fasi di test.

### ***Play e Stop***

È possibile cliccare il pulsante *Play* per avviare l'esecuzione nella Sala, con tempi predefiniti e stop automatico.

Il pulsante *Stop* funge anche da *Reset*, e annulla tutte le impostazioni precedentemente impostate sia in fase di test che di preparazione reale.

### ***Pannelli di visualizzazione***

Nella parte sottostante al pannello di controllo troviamo quattro pannelli di visualizzazione delle Stanze in fase di esecuzione, tramite oscilloscopi e Nodes pad, che facilitano la supervisione delle singole stanze.

Ogni Stanza ha un pannello di controllo dedicato con la quale l'utente interagisce tramite controller midi. Per ogni stanza ci sarà un controller MIDI diverso che manipola parametri diversi.

### **MIDI Controllers**

I controlli utente sviluppati per le stanze sono volutamente semplici e intuitivi per consentire a qualsiasi utente, anche non qualificato, un'esperienza piacevole.

Nella **Stanza A** è necessario un controller MIDI che regola tre slider, ogni slider controlla una sintesi diversa dell'armonizzatore. Le tre sintesi sono rispettivamente due sintesi AM e una sintesi FM. Queste lavorano

autonomamente e vengono sommate in fase di spazializzazione presente nella sala di esecuzione.

Nella **Stanza B** l'utente controlla un Matrix 4x16, di cui ogni riga rappresenta un oggetto sonoro e le colonne sono gli on-set dell'evento. Di fatto il Matrix rappresenta una *drum machine*, dove è possibile programmare due battute metriche. Per ogni oggetto è presente, inoltre, un altro controller che gestisce un Nodes pad che fonde quattro versioni dell'oggetto sonoro modificate in decay time, pitch scale e filter scale. Questi valori possono essere modificati e ascoltati in tempo reale.

La **Stanza C** è basata sull'esecuzione di un campione che può essere manipolato da quattro slider che regolano la frequenza della modulazione LFO e le frequenze di tre modulazioni FM applicate a bassi, medi e alti. Inoltre, è possibile regolare la porzione di campione ascoltata.

La **Stanza D** ha bisogno di quattro slider che fungono da moltiplicatori frequenziali, cambiando così l'ampiezza dei cluster. Inoltre, all'aumentare del valore dello slider, vengono modificate anche le proprietà del riverbero.

---

<sup>1</sup> Un **controller MIDI** è un dispositivo che invia dati Musical Instrument Digital Interface (*MIDI*) a un computer o a strumenti musicali elettronici per controllarne le funzioni, senza produrre suono autonomamente, ma attraverso il **protocollo MIDI**, un linguaggio standardizzato che consente di trasmettere informazioni relative a note, velocity, controllo del volume, cambiamenti di timbro e altri parametri musicali.

<sup>2</sup> Il **protocollo UDP** (*User Datagram Protocol*) è un protocollo di trasmissione dati ideale per applicazioni in tempo reale, utilizzato in reti di computer per inviare pacchetti in modo veloce e senza connessione.

## 2. Stanze di generazione

### **Stanza A – Armonizzatore di bande passanti costruito su spettro reale**

Un **armonizzatore di bande passanti costruito su spettro reale** è uno strumento che utilizza informazioni spettrali derivate da una sorgente sonora reale, come la voce umana o uno strumento acustico, per generare nuovi suoni armonici in base alle frequenze principali.

L'analisi della registrazione della sorgente sonora, attraverso l'uso del software **Spear**, identifica le prime  $n$  frequenze predominanti (formanti nel caso della voce), che costituiscono le componenti armoniche più importanti dello spettro.

Ogni formante o picco di frequenza rilevato nello spettro viene trattato come frequenza centrale di un filtro **passabanda risonante** a partire da un rumore rosa. L'armonizzatore applica più filtri passabanda risonanti, ognuno, quindi, centrato sulle frequenze rilevanti dello spettro reale.

A partire dal campione la registrazione della voce di una donna adulta, ho proceduto a determinare le prime otto formanti di ampiezza rilevante, per inserirle all'interno dell'armonizzatore.

Una volta definite le bande passanti, il suono può essere ulteriormente modulato utilizzando tecniche di **modulazione di frequenza (FM)**, **modulazione di ampiezza (AM)** o tramite **LFO (Low-Frequency Oscillators)**, per arricchire il risultato con variazioni dinamiche e di texture, aggiungendo movimento al suono.

Il controllo di tali parametri, attraverso sliders, è lasciato all'utente, che ha cinque minuti per preparare la sonorità.

La scelta estetica del campione vocale di una **donna adulta** è strettamente legata all'idea di evocare le prime fasi della vita umana, come la gestazione

e la prima infanzia, periodi in cui la voce della madre ha un ruolo essenziale. La voce femminile, e in particolare quella materna, è spesso il primo suono che un bambino percepisce durante lo sviluppo fetale, ed è uno degli elementi più profondi e riconoscibili nella costruzione del legame tra madre e figlio.

L'utilizzo della **voce femminile** come campione riflette questa connessione primordiale, rappresentando non solo la presenza fisica della madre, ma anche la sua funzione rassicurante, protettiva e nutritiva.

Questa voce diventa il mezzo attraverso il quale il brano esplora i ricordi più antichi e radicati, riconnettendo l'ascoltatore a quel periodo vulnerabile e formativo della propria esistenza. Le elaborazioni elettroniche che seguiranno, attraverso l'uso di **LFO** e **FM**, trasformeranno questa voce originaria in qualcosa di troppo complesso per individuare la vera origine del timbro, rappresentando il modo in cui un bambino non comprende la complessità del mondo che lo circonda.

### **Stanza B – Rhythm Sequencer**

Questa *Stanza* è stata programmata per essere un Rhythm sequencer, ispirato alla drum machine, in utilizzo nella maggior parte delle DAW moderne. Questa viene gestita da un Matrix che ha la lunghezza di due barre metriche. Gli oggetti suonati dal sequencer ritmico, sono generati dalla patch stessa a partire da onde rettangolari e noise, ai quali vengono appositamente applicati filtri e involuppi (ADSR). Il controllo da parte dell'utente è duplice, di fatto è chiamato sia a programmare le unità ritmiche della sequenza che l'oggetto stesso. L'oggetto stesso può essere modifica o miscelato, con altre tre versioni dello stesso, che sono disponibili come preset. Questi preset possono essere aggiornati e modificati per creare il giusto mix.

Questa *Stanza* richiama simbolicamente la fase della gioventù, un momento della vita caratterizzato da vitalità, movimento e creatività senza limiti. Dal punto di vista estetico, questa *Stanza* ha l'intento di creare un'atmosfera

dinamica, dove i ritmi programmati e filtrati, dall'esperienza dell'utente, evocano l'energia spensierata di questo periodo. I suoni prodotti nella *Stanza B* sono vivaci e pulsanti, come un battito che riflette la vitalità e la foga della giovinezza. La *Stanza B* riveste un ruolo fondamentale nell'evoluzione del brano, segnando il passaggio dalla fase iniziale, simbolicamente legata alla nascita, a un momento più complesso e dinamico.

Questa fase, rappresentata dalla gioventù, introduce l'idea del movimento costante e della sperimentazione sonora, un momento in cui il ritmo diventa protagonista e il suono si trasforma da semplice sequenza a espressione viva e pulsante. Il sequencer ritmico della stanza B permette non solo di esplorare il tempo e il ritmo, ma anche di plasmare l'identità sonora del brano attraverso la creatività e l'intervento diretto dell'utente. La possibilità di modificare e miscelare i suoni nei minuti di preparazione riflette il carattere in continua evoluzione della gioventù, un momento di scoperta e di crescita.

### **Stanza C – Manipolazione di “Ricordo di infanzia” di Nino Rota**

Il brano scelto per la *Stanza C* è tratto da “Otto e mezzo” di Fellini: "Ricordo d'infanzia" di Nino Rota, compositore noto per la sua capacità di evocare emozioni profonde attraverso melodie semplici e nostalgiche. La scelta del campione da manipolare per questa stanza ha una forte valenza estetica, in quanto mira a ricreare una connessione emotiva con il passato, attraverso un suono che rappresenta i ricordi dell'infanzia.

Dal punto di vista tecnico, la *Stanza C* si sviluppa come manipolazione del campione mediante LFO<sup>1</sup> e FM<sup>2</sup>; l'LFO è applicata a tutto il segnale, mentre la FM è applicata separatamente a tre bande di frequenza (bassi, medi, alti), determinando una stratificazione del suono, dove ogni parte del campione viene modificata in modo distinto ma sincronizzato.

Il progetto prevede un livello di interazione in cui l'utente può intervenire sui parametri di modulazione, influenzando direttamente il risultato sonoro e l'esperienza d'ascolto. I parametri di **LFO** e **FM** sono esposti e resi

modificabili per cinque minuti, permettendo all'utente di alterare la frequenza delle modulazioni. In questo modo, l'utente può esplorare le diverse varianti del campione, generando nuove combinazioni sonore che rappresentano interpretazioni personali e uniche.

Ogni banda di frequenza (bassi, medi, alti) può essere controllata singolarmente, consentendo all'utente di accentuare o ridurre determinate componenti del suono.

La scelta della modulazione è finalizzata a frammentare e trasformare il campione originale, creando un effetto di distorsione del ricordo, simile a come la memoria trasforma e talvolta distorce le esperienze passate.

L'utilizzo di **LFO** permette di creare variazioni cicliche nell'intensità campione, simulando il fluire discontinuo e irregolare dei ricordi. L'FM, cambiando la frequenza del segnale, introduce stratificazioni sonore, arricchendo il campione di complessità e imprevedibilità, in modo da riflettere la natura mutevole della memoria.

Questa manipolazione elettronica ha lo scopo di rappresentare l'idea che i ricordi dell'infanzia sono raramente lineari o chiari, ma piuttosto frammentati e soggetti a reinterpretazioni. La stanza C, quindi, attraverso la spazializzazione e la trasformazione del campione di Rota, diventa uno spazio sonoro che evoca la nostalgia e il rimpianto, ma anche la gioia e la spensieratezza tipiche dell'infanzia.

La spazializzazione è suddivisa in tre sorgenti sonore, ognuna legata a una banda di frequenza. Questi punti si muovono in uno schema ciclico all'interno di uno spazio, mantenendo sempre una posizione reciproca di triangolo equilatero.

La rotazione ciclica dei tre punti nello spazio sonoro contribuisce a creare una sensazione di movimento vorticoso, che rievoca il flusso di ricordi. Questo movimento suggerisce la ricostruzione di un ricordo che emerge nella mente, avvolgendo l'ascoltatore con i tre suoni che si rincorrono.

## **Stanza D – Electronic flouting clusters**

La *Stanza D*, rappresentazione della vecchiaia e della morte, si sviluppa in uno spazio sonoro fatto di lenti movimenti e cambiamenti impercettibili, in cui il tempo sembra dilatarsi e sfuggire. Quattro voci principali agiscono come pilastri sonori, ciascuna contenente un cluster di altre quattro voci interne, come echi lontani che si richiamano a vicenda. Questi cluster, in continuo movimento, oscillano lentamente in frequenza, creando un flusso sonoro fluido e instabile, dove ogni frequenza si muove indipendentemente, dettata da un percorso, sempre probabilistico, di *drunk walk*. Questa variazione non lineare e sfalsata tra le voci è un riflesso del cammino incerto e frammentato del tempo verso il suo epilogo.

L'elemento spaziale è centrale nella *Stanza D* ogni suono, completamente immerso nel riverbero programmato in **Gen**, perde il suo confine netto, sciogliendosi in una massa sonora che fluttua nel vuoto. Qui si palesa un mondo distante e rarefatto, dove i suoni non hanno più radici, ma si diffondono come onde che si allontanano sempre di più, perdendosi in uno spazio senza fine. L'atmosfera sospesa e onirica trasporta l'utente in una dimensione dove il passato, il presente e il futuro si intrecciano e si confondono.

Il controllo dell'utente, in questa stanza, è un esercizio di sottile trasformazione. I quattro *multisliders*, che governano la moltiplicazione frequenziale di ciascun cluster, non solo ne accrescono la complessità, ma portano l'intero ambiente sonoro verso nuove vette di densità. Ogni aumento del moltiplicatore aggiunge non solo frequenze, ma anche complessità al riverbero, intensificando la sensazione di un suono che si espande e si stratifica, diventando sempre più intricato e avvolgente. L'interazione con questi controlli non è mai immediata, ma piuttosto un viaggio lento e graduale verso un climax sonoro, dove la complessità diventa sinonimo di

immersione totale, fino a sfociare in una condizione di completo smarrimento.

La *Stanza D* diventa così un luogo di riflessione e disfacimento, un paesaggio acustico che ricorda il lento scorrere del tempo e l'inevitabile dissoluzione di tutte le cose. La moltiplicazione delle frequenze e la crescita della complessità sonora, riflettendo il percorso della vita che diventa sempre più ricco e stratificato, culmina in un suono che sembra espandersi all'infinito, dissolvendosi in un riverbero che avvolge ogni cosa in una spirale di eterna sospensione.

---

## Appendice

<sup>1</sup> La **modulazione a bassa frequenza (LFO)** è una tecnica che applica una variazione periodica al segnale sonoro. L'LFO varia ciclicamente tra un valore massimo e uno minimo, generando oscillazioni d'ampiezza del suono originale.

<sup>2</sup> La **modulazione di frequenza (FM)**, invece, introduce variazioni rapide e complesse nella frequenza del segnale, arricchendo il suono con armoniche inaspettate e creando un senso di complessità e instabilità.

### 3. Gestione del caos

I modelli di gestione del caos nella composizione algoritmica consentono di creare eventi, gesti e movimenti spaziali imprevedibili, utilizzando principi matematici e fisici **per garantire un'esperienza di ascolto unica a ogni esecuzione**. Questo approccio genera variazioni continue che evitano la ripetitività dei suoni e dei gesti; applicati alla spazializzazione, i modelli caotici arricchiscono l'interazione con il materiale sonoro, amplificando l'effetto immersivo.

#### **Sistemi Basati su modelli fisici/geometrici**

Il Sistema Basato su modelli fisici/geometrici sfrutta l'oggetto *jsui* per implementare un algoritmo in **JavaScript** che modella un'interazione visiva e sonora complessa. Lo script genera un poligono rotante che si muove a una velocità dinamica, all'interno del quale vengono lanciate diverse palline. Ogni pallina possiede caratteristiche dinamiche come velocità e gravità, anch'esse programmate all'interno dello script, che ne influenzano il comportamento.

Le palline, sottoposte agli effetti della gravità, rimbalzano contro i lati del poligono mentre questo ruota. Ogni volta che avviene una collisione, otteniamo in output l'indice della pallina e del lato permettendo di collegare questa interazione fisica e geometrica all'evoluzione del brano, rendendo questo sistema non solo rappresenta un modello geometrico, ma anche da meccanismo di controllo probabilistico.

#### **Sistemi probabilistici**

Il processo probabilistico che è stato utilizzato nella patch è associato alle singole *Stanze* (A, B, C, D), introducendo elementi di casualità e dinamismo nella composizione. Questo sistema **probTable** funziona tramite la

generazione di liste probabilistiche che vengono create in base alle interazioni dell'utente con la stanza B. Ogni volta che l'utente programma un pattern ritmico nella stanza B, i dati risultanti vengono convertiti in codice binario per essere analizzati e utilizzati per costruire quattro liste di valori. Queste liste, una volta create, vengono *bangate* (attivate) tramite messaggio e indirizzate a un multislider, che varia in funzione della sezione di brano in cui ci troviamo, creando una densità probabilistica diversificata e coerente con l'interazione dell'utente. Questa struttura probabilistica garantisce che il brano sia dinamico e influenzato inconsciamente dalle scelte dell'utente, introducendo una casualità controllata che ne arricchisce con variazioni continue e non prevedibili.

### **Spazializzazione**

Il brano si svolge attraverso processi di casualità controllata che gestiscono la spazializzazione. Per il controllo abbiamo scelto la Distribuzione di Poisson e le Leggi di Lorenz

#### ***Distribuzione di Poisson***

Il processo di Poisson è un tipo di processo stocastico<sup>1</sup> che descrive eventi che si verificano in maniera casuale e indipendente nel tempo o nello spazio. Nel contesto spaziale, la distribuzione di Poisson descrive la probabilità di trovare un certo numero di eventi (o punti) all'interno di una data area o volume. Questo tipo di modello viene utilizzato frequentemente per descrivere distribuzioni casuali e indipendenti di punti nello spazio, come la disposizione degli alberi in una foresta o le galassie nell'universo.

La probabilità che esattamente **k** eventi siano presenti in un'area **A** è data dalla **distribuzione di Poisson**:

$$P(k; \lambda A) = \frac{(\lambda A)^k e^{-\lambda A}}{k!}$$

dove  $\lambda A$  è il numero medio atteso di eventi nella regione considerata.

Il numero medio di eventi in un'area o volume dato è controllato dal parametro  $\lambda$ , che rappresenta la densità media di eventi per unità di area o volume. Per esempio, se  $\lambda = 5$ , ci aspettiamo una media di 5 eventi per unità di superficie (per esempio, per metro quadrato).

Il **processo di Poisson** è un modello matematico utilizzato per descrivere eventi che si verificano casualmente in un dato intervallo di tempo o spazio, seguendo un tasso costante. È uno dei processi stocastici più importanti ed è ampiamente utilizzato in vari ambiti fisici, matematici e ingegneristici. La caratteristica principale del processo di Poisson è che gli eventi accadono indipendentemente l'uno dall'altro, e la probabilità che si verifichi un evento in un piccolo intervallo di tempo o spazio è proporzionale alla lunghezza di quell'intervallo.

Nella stanza A, la spazializzazione sonora è gestita utilizzando una distribuzione di Poisson implementata tramite Max/MSP come generatore algoritmico di eventi spaziali. La distribuzione casuale è costruita variando il parametro  $k$  da 1 a 19 e generando casualmente il parametro  $\lambda$  tra 1 e 20. Questa configurazione produce una lista di 200 elementi che rappresentano una serie di angoli distribuiti secondo Poisson. Ogni volta viene selezionato un punto casuale come centro della posizione spaziale intorno all'ascoltatore, con la campana di probabilità regolata in funzione di  $\lambda$ : la probabilità di trovare il suono è massima al centro e sfuma man mano che ci si allontana. Gli angoli così ottenuti vengono convertiti nell'angolo  $\theta$  di una posizione spaziale polare con raggio fisso. Questa tecnica consente di creare una sensazione di sfumata convergenza spaziale del materiale sonoro.

### ***Leggi di Lorenz***

Le leggi di Lorenz, nel contesto del movimento di una particella di un fluido, sono legate al **modello dell'attrattore di Lorenz**, che descrive il comportamento caotico di un sistema dinamico non lineare, originariamente sviluppato per studiare i modelli meteorologici. Questo sistema si basa su

tre equazioni che descrivono l'evoluzione nel tempo di una particella di fluido sottoposta a convezione:

$$\begin{cases} x_{new} = x + (\sigma \cdot (y - x)) \cdot \Delta t \\ y_{new} = y + (x \cdot (\rho - z) - y) \cdot \Delta t \\ z_{new} = z + (x \cdot y - b \cdot z) \cdot \Delta t \end{cases}$$

L'equazione per  $x$  descrive la velocità di cambiamento della particella in relazione alla differenza di temperatura tra lo strato superiore e inferiore del fluido, dove  $\sigma$  è il numero di Prandtl (un parametro che misura la diffusività termica e viscosa del fluido).

L'equazione per  $y$  rappresenta l'effetto combinato della convezione e della rotazione, dove  $\rho$  è il parametro di Rayleigh, che misura la forza della convezione nel fluido.

L'equazione per  $z$  descrive il gradiente di temperatura nel fluido, dove  $b$  è un parametro geometrico che rappresenta la proporzione della struttura del sistema di convezione.

Il modello descrive il **moto caotico** e imprevedibile di una particella in un fluido convettivo. Viene infatti spesso utilizzato per studiare il caos nei sistemi dinamici, come la meteorologia o la dinamica dei fluidi.

Gli **attrattori di Lorenz** descrivono come, a lungo termine, le traiettorie della particella si muovano in un comportamento caotico ma con una struttura delimitata nello spazio delle fasi (l'attrattore), che non è mai ripetitiva e non converge a una traiettoria fissa.

Nella stanza D, la spazializzazione sonora è gestita attraverso l'uso delle equazioni di Lorenz implementate in Max/MSP, sfruttate per generare un percorso spaziale complesso e caotico. Le variabili sono inizializzate con i valori  $x = 0.5$ ,  $y = 0.3$  e  $z = 1$ , e vengono poi elaborate secondo il sistema di equazioni di Lorenz, che produce traiettorie non lineari. Le coordinate  $x$  e  $y$  vengono convertite in posizioni cartesiane del puntatore, gestendo la spazializzazione in *Nodes*<sup>2</sup>, mentre la variabile  $z$  influisce sull'ampiezza

generale della stanza, modulando l'intensità sonora percepita. Questo approccio crea una spazializzazione dinamica e imprevedibile, in cui i suoni si muovono seguendo un percorso sensibile alle piccole variazioni, amplificando l'esperienza immersiva con un senso di movimento caotico e affascinante.

---

## Appendice

<sup>1</sup> Un **processo stocastico** è un modello matematico utilizzato per descrivere fenomeni che variano nel tempo o nello spazio in maniera casuale. In un processo stocastico, il comportamento di una variabile cambia con il passare del tempo, e tale cambiamento è influenzato da elementi di casualità o incertezza. Ciò significa che, per un dato istante futuro, non possiamo prevedere esattamente quale sarà il valore della variabile, ma possiamo fare delle previsioni probabilistiche basate sul suo stato attuale. La casualità è una caratteristica centrale del processo stocastico. Mentre alcuni sistemi fisici sono descritti da leggi deterministiche, i sistemi modellati da processi stocastici includono un livello di imprevedibilità.

<sup>2</sup> In Max/MSP, l'oggetto **Nodes** è uno strumento grafico che consente di creare e gestire punti di controllo, o nodi, in uno spazio bidimensionale. Questo oggetto è utilizzato frequentemente per la spazializzazione sonora e il controllo di parametri spaziali, poiché permette di rappresentare graficamente posizioni x e y su un piano, assegnando valori specifici a ciascun nodo.

### III. Progettazione di Coatta

Nel contesto della **valorizzazione dei beni culturali** attraverso le tecnologie avanzate, l'innovazione nel campo dell'acustica assume un ruolo cruciale. La presente tesi si focalizza sul progetto e lo sviluppo di **Coatta**, un *diffusore acustico coassiale a due vie*, concepito per essere utilizzato all'interno di un padiglione di ascolto dedicato alla fruizione del brano algoritmico di musica elettronica intitolato "*Studio sull'imbroglio*". Questo progetto rappresenta l'integrazione tra le competenze acustiche e le tecnologie digitali per creare un'esperienza immersiva e coinvolgente.

L'obiettivo della progettazione di **Coatta** è quello di realizzare un diffusore compatto, ideato per la riproduzione di specifiche bande di frequenza all'interno dello spazio controllato della *Stanza A* di preparazione del materiale sonoro nel padiglione di ascolto. Le dimensioni ridotte, la configurazione coassiale e l'ottimizzazione meccanica del cabinet sono pensati per fornire un'accurata riproduzione del suono.

Nello sviluppo di **Coatta**, sono stati considerati vari aspetti della progettazione acustica, come la scelta degli altoparlanti e del filtro crossover, l'analisi delle prestazioni tramite software di simulazione avanzati (tra cui VituixCAD e Autodesk Fusion), e l'ottimizzazione della risposta del diffusore in relazione all'acustica della stanza. Il driver coassiale *SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX*, scelto per la sua affidabilità e le specifiche tecniche, è stato sottoposto a un'accurata simulazione in aria libera e in cassa acustica, per garantire una riproduzione fedele del suono in un ambiente ottimizzato.

La sfida di coniugare compattezza, qualità sonora e innovazione tecnologica si inserisce in un discorso più ampio sulla valorizzazione del suono come

strumento per l'esperienza culturale, offrendo al fruitore un'immersione sonora totale attraverso soluzioni acustiche all'avanguardia. La tesi, pertanto, non solo esplora gli aspetti tecnici legati alla progettazione del diffusore, ma propone anche una riflessione sul ruolo della tecnologia nel ridefinire le modalità di fruizione dei contenuti culturali.

### **Software e hardware per la progettazione**

Nella progettazione acustica moderna, l'integrazione di software e hardware specializzati è essenziale per ottenere risultati di alta qualità. I software di simulazione permettono di analizzare e ottimizzare le prestazioni sonore dei diffusori, facilitando decisioni informate nel processo di design. Parallelamente, l'uso di strumenti di misura accurati durante le fasi di misurazione consente di valutare e verificare le caratteristiche acustiche del sistema, assicurando che le specifiche progettuali siano rispettate.

#### ***VituixCAD***

VituixCAD è un software di simulazione acustica avanzato che permette di progettare e ottimizzare sistemi di altoparlanti, come cabinet e crossover. Tra le sue principali funzioni, VituixCAD consente di simulare la risposta in frequenza, la risposta all'impulso e l'impedenza del sistema. È particolarmente utile per calcolare le curve di fase, prevedere l'interazione tra gli altoparlanti in un sistema multi-via e ottimizzare i filtri crossover per migliorare la qualità sonora complessiva. Inoltre, supporta l'importazione di file FRD<sup>1</sup> e ZMA<sup>2</sup> per una simulazione accurata delle prestazioni degli altoparlanti in ambienti reali.

#### ***Autodesk Fusion***

Autodesk Fusion 360 è un software di modellazione 3D e progettazione assistita (CAD) particolarmente utile per la progettazione di cabinet acustici. Grazie alle sue potenti funzionalità di modellazione parametrica e simulazione, consente di creare modelli tridimensionali dettagliati del diffusore, ottimizzando ogni aspetto del design strutturale. Fusion 360

permette di visualizzare e analizzare la distribuzione interna dei componenti, le dimensioni del cabinet e le caratteristiche dei materiali, garantendo una costruzione solida e adeguata dal punto di vista acustico. Inoltre, offre strumenti di simulazione meccanica per valutare l'integrità strutturale e le vibrazioni, migliorando così le prestazioni complessive del diffusore.

### **Cassa acustica coassiale**

Uno speaker coassiale è un altoparlante che integra più driver, tipicamente un tweeter e un woofer, allineati sullo stesso asse. Questo design migliora l'integrazione sonora, poiché entrambi i driver emettono da un unico punto, riducendo i problemi di fase presenti in configurazioni con driver separati.

Il tweeter, posto al centro del woofer, permette di diffondere frequenze alte e basse dalla stessa posizione, assicurando una maggiore coerenza temporale tra le diverse gamme sonore. Questo elimina sfasamenti che, in sistemi tradizionali con driver separati, possono compromettere la qualità del suono. Il design coassiale è inoltre compatto, rendendo l'altoparlante ideale per spazi ridotti come monitor da studio o sistemi audio per auto. La provenienza del suono da un unico punto fisico migliora l'immagine sonora, creando una percezione più precisa e stabile.

La progettazione e la realizzazione di una **cassa acustica con driver coassiale** richiede un processo complesso e articolato in diverse fasi, che vanno dalla definizione delle specifiche tecniche fino alla costruzione finale. Il design coassiale viene scelto per minimizzare i problemi di fase tra woofer e tweeter, migliorando la coerenza temporale del suono, e per determinare le dimensioni ridotte del cabinet cubico con Bass-Reflex, che si pongono simili a quelle di una cassa acustica mono via ma permettendo una migliore risposta sia in termini di range frequenziale che di linearità.

Nelle prossime pagine illustrerò le quattro fasi di progettazione:

1. Scelta dei componenti
2. Progettazione del cabinet
3. Progettazione del Filtro Crossover
4. Costruzione prototipo

---

## Appendice

<sup>1</sup> Un file **FRD** (Frequency Response Data) è un formato utilizzato per rappresentare i dati della risposta in frequenza di un altoparlante o di un sistema audio. Questo tipo di file contiene tre colonne di dati che descrivono il comportamento dell'altoparlante in termini di **ampiezza** e **fase** a diverse frequenze. I file **FRD** vengono comunemente utilizzati in software di simulazione e progettazione come VituixCAD per importare i dati di risposta di un driver e integrarli nelle simulazioni, permettendo una valutazione accurata del comportamento dell'altoparlante nel sistema complessivo.

<sup>2</sup> Un file **ZMA** (Impedance Data) è un formato utilizzato per rappresentare la curva di **impedenza** di un altoparlante o di un sistema audio in funzione della frequenza. Come il file FRD per la risposta in frequenza, il file ZMA contiene tre colonne di dati, ognuna delle quali fornisce informazioni chiave sul comportamento elettrico dell'altoparlante. I file **ZMA** sono comunemente utilizzati nei software di progettazione di altoparlanti, come VituixCAD, per simulare il comportamento dell'impedenza dell'altoparlante in un circuito complesso e per progettare correttamente il filtro crossover. Questi dati aiutano a capire come l'altoparlante risponde elettricamente, in particolare per ottimizzare l'efficienza e prevenire problemi di carico con l'amplificatore.

## 1. Scelta dei componenti

Dopo una attenta ricerca sulla rete riguardo la scelta del diffusore, l'attenzione è ricaduta sull'*SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX* (le cui specifiche sono in Tabella 1) in compromesso tra qualità progettuale e costruttiva, compattezza e contenimento dei costi.

*Tabella 1 SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX*

| PARAMETRI                       |              | WOOFER |                 | TWEETER |          |
|---------------------------------|--------------|--------|-----------------|---------|----------|
| Impedenza nominale              |              | 4      | $\Omega$        | 4       | $\Omega$ |
| Resistenza CC                   | $Re$         | 3.2    | $\Omega$        | 3.0     | $\Omega$ |
| Induttanza della bobina mobile  | $Le$         | 0.30   | mH              | N/A     |          |
| Area effettiva del pistone      | $Sd$         | 82     | cm <sup>2</sup> | N/A     |          |
| Diametro bobina mobile          |              | 25.4   | mm              | 12.4    | mm       |
| Altezza della bobina mobile     |              | 14.3   | mm              | 1.2     | mm       |
| Altezza del traferro            |              | 5      | mm              | 1.5     | mm       |
| Corsa lineare della bobina      | $(p-p)$      | 9.3    | mm              | N/A     |          |
| Densità del flusso magnetico    |              | 1.1    | T               | 1.05    | T        |
| Peso del magnete                |              | 0.36   | kg              | 0.003   | kg       |
| Peso netto                      |              | 0.93   | kg              | 0.014   | kg       |
| Risonanza in aria libera        | $Fs$         | 43     | Hz              | 1300    | Hz       |
| Sensibilità                     | $(2.83V/1m)$ | 90     | dB              | 89      | dB       |
| Fattore Q meccanico             | $Qms$        | 2.26   |                 | N/A     |          |
| Fattore Q elettrico             | $Qes$        | 0.3    |                 | N/A     |          |
| Fattore Q totale                | $Qts$        | 0.27   |                 | N/A     |          |
| Massa mobile inclusa aria       | $Mms$        | 9.1    | g               | N/A     |          |
| Fattore di forza                | $Bl$         | 5.1    | Tm              | N/A     |          |
| Volume equivalente              | $Vas$        | 14.4   | liters          | N/A     |          |
| Conformità                      | $Cms$        | 1.51   | mm/N            | N/A     |          |
| Perdita meccanica               | $Rms$        | 1.1    | kg/s            | N/A     |          |
| Gestione della potenza nominale |              | 40     | W               | 10      | W        |

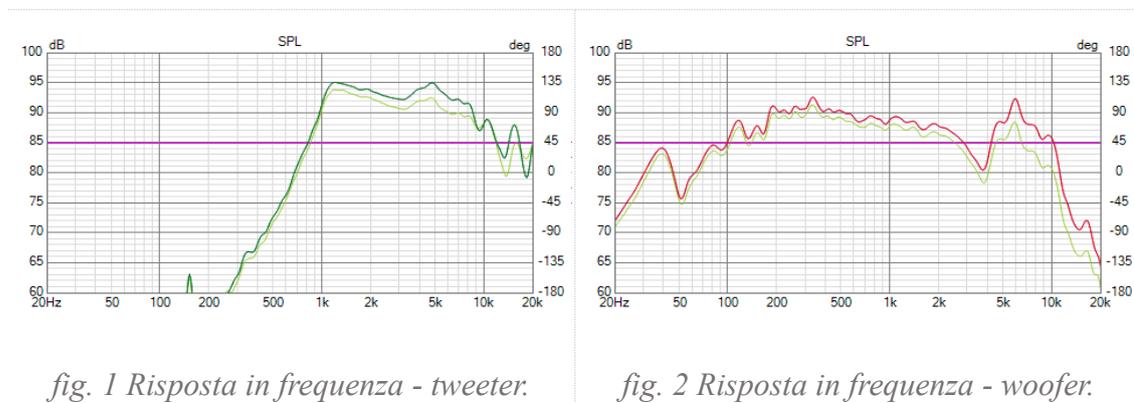
L'adozione di un crossover passivo per il diffusore Coatta si rivela una scelta strategica per diverse ragioni. Innanzitutto, un crossover passivo semplifica l'implementazione del sistema, riducendo la complessità delle connessioni e garantendo una facile integrazione con l'amplificatore da 50W a 4 Ohm,

previsto per l'alimentazione della cassa. Questo tipo di crossover consente di separare le frequenze in modo efficace, dirigendo le basse frequenze al woofer e le alte frequenze al tweeter, ottimizzando così le prestazioni sonore senza la necessità di alimentazione esterna.

### **Analisi e simulazione delle risposte in frequenza**

L'analisi e la simulazione delle risposte in frequenza SPL, fase e impedenza sono fondamentali per valutare le prestazioni acustiche di un sistema di diffusori. Attraverso questi strumenti, è possibile prevedere come il diffusore riprodurrà il suono a diverse frequenze, identificando eventuali irregolarità nella risposta. La simulazione consente di ottimizzare il design del sistema, garantendo una migliore integrazione tra i trasduttori, il cabinet e il filtro crossover, migliorando così la coerenza del segnale e l'efficienza acustica complessiva.

### **Risposta SPL**



Dall'analisi delle risposte in **SPL** dei due diffusori (*fig. 1* e *fig. 2*), emergono alcune considerazioni significative sulle prestazioni complessive del sistema. Il tweeter mostra un rapido decadimento al di sotto della soglia di **1.2 kHz**, evidenziando la sua limitata capacità di gestire frequenze più basse. Questa caratteristica è tipica di un trasduttore progettato per operare principalmente nelle *alte frequenze*, dove la sua efficienza è massimizzata. Il decadimento sotto i **1.2 kHz** è progressivo ma piuttosto marcato, il che rende evidente la necessità di un *crossover* ben calibrato per impedire che il

tweeter lavori al di fuori della sua banda ottimale, evitando distorsioni e migliorando la qualità sonora complessiva nella regione delle *basse frequenze*.

Il woofer da **5"**, invece, si comporta in modo decisamente diverso. La sua **risposta SPL** si estende in maniera più ampia, con una banda passante che arriva fino ai **3.6 kHz**, mostrando una capacità di coprire una porzione significativa dello spettro sonoro. Le dimensioni maggiori del woofer, rispetto a modelli più piccoli, giocano un ruolo fondamentale nell'offrire una migliore estensione nelle *basse frequenze*. Questa estensione permette una riproduzione più completa e dettagliata delle frequenze inferiori, garantendo una risposta più robusta e naturale.

Un ulteriore elemento positivo nella performance del woofer è il comportamento nelle *frequenze basse*: si nota un lento decadimento al di sotto dei **100 Hz**, che rientra ancora nella sua banda passante. Questo comportamento è un chiaro indicatore della qualità di costruzione del componente, capace di offrire una buona risposta anche nei limiti inferiori dello spettro, pur senza perdere in precisione o linearità. In sintesi, il woofer da **5"** offre una *risposta in frequenza* ampia e bilanciata, mentre il tweeter richiede un'attenzione particolare nella gestione delle *basse frequenze* per mantenere una coerenza sonora nel sistema complessivo.

### ***Risposta in impedenza***

La risposta in impedenza del tweeter e del woofer è caratterizzata dalla presenza di picchi in corrispondenza delle loro rispettive *frequenze di risonanza (Fs)*. Nel caso del tweeter, un lieve picco a **1300 Hz** rappresenta il punto in cui la sua membrana entra in *risonanza*, ovvero il momento in cui l'**impedenza** elettrica aumenta sensibilmente. Questo comportamento è tipico dei trasduttori a membrana leggera e alta frequenza, dove l'energia meccanica del sistema viene immagazzinata e restituita in modo inefficiente a quella frequenza specifica, risultando in un'oscillazione dell'**impedenza**.

Analogamente, il woofer mostra un picco più pronunciato a **43 Hz**, in corrispondenza della sua **F<sub>s</sub>**, tipica di un trasduttore progettato per gestire *frequenze basse*. A questa frequenza, la *massa mobile* e la *cedevolezza* del sistema sospensivo creano una *risonanza naturale*, con un conseguente aumento significativo dell'**impedenza**. Questo picco rappresenta un limite naturale di risposta in cui l'efficienza del woofer nel produrre suoni è ridotta, a causa del comportamento reattivo del sistema.



fig. 3 Risposta in impedenza - tweeter

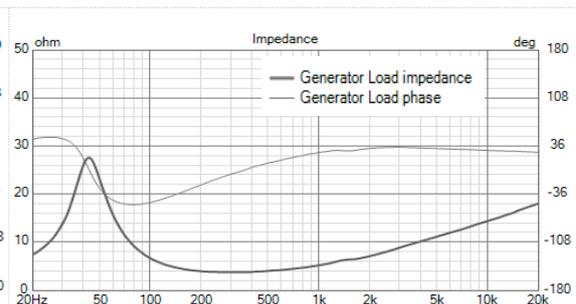


fig. 4 Impedenza - woofer con reflex

Come vedremo più avanti, entrambi i picchi in **impedenza**, nel tweeter e nel woofer, possono avere un impatto sulla progettazione del *crossover*. Il *crossover* deve essere attentamente progettato per tenere conto di queste variazioni di **impedenza**, evitando distorsioni o disallineamenti nella riproduzione sonora tra i due trasduttori, soprattutto nelle aree di transizione tra *basse e alte frequenze*. Questi picchi, se non correttamente gestiti, possono compromettere la linearità della *risposta in frequenza* complessiva del sistema.



## 2. Progettazione del cabinet

Il principale obiettivo per cui un altoparlante viene racchiuso nella cassa acustica è quello di isolare la radiazione frontale (l'onda sonora emessa dalla parte anteriore del cono) da quella posteriore. Queste onde, infatti, sono emesse in opposizione di fase e, se non opportunamente separate, potrebbero interagire negativamente causando una parziale cancellazione del suono generato dalla membrana vibrante.

Le funzioni svolte dal mobile variano in base al tipo di diffusore. Nella cassa chiusa, l'obiettivo principale è quello di eliminare l'emissione posteriore del diaframma vibrante del woofer e, al contempo, di offrire al trasduttore un volume chiuso d'aria con una cedevolezza specifica.

Nel caso del sistema Bass-Reflex, sia a semplice apertura che a condotto, il mobile è progettato per sfruttare, in una certa gamma di frequenze, l'onda posteriore del woofer, restituendola in fase con l'onda anteriore attraverso l'apertura. Questo meccanismo permette di ottenere un rafforzamento dell'emissione sonora principale. Anche in questo caso, il mobile offre al trasduttore un volume d'aria con una cedevolezza appropriata.

I mobili a tromba, invece, sono progettati per ottimizzare l'accoppiamento acustico tra una delle facce del woofer e l'ambiente circostante, eliminando o sfruttando l'onda posteriore del trasduttore.

I sistemi Bass-Reflex e le casse chiuse vengono definiti a radiazione diretta, poiché l'energia sonora è accoppiata direttamente all'aria senza l'impiego di dispositivi di adattamento dell'impedenza acustica.

### **Storia della progettazione dei cabinet per cassa elettroacustica**

La progettazione dei cabinet ha una lunga storia che si intreccia con lo sviluppo degli altoparlanti e delle tecnologie elettroacustiche. La funzione

primaria del cabinet è quella di ospitare i driver e gestire il modo in cui le onde sonore si propagano, minimizzando le risonanze e controllando la risposta in frequenza.

Durante gli anni '20 e '30 del '900 nascono i primi cabinet per altoparlanti, spesso semplici strutture in legno progettate per amplificare il suono prodotto dai primi altoparlanti a tromba. La Western Electric fu tra i pionieri nello sviluppo di cabinet per diffusori sonori usati nei primi sistemi cinematografici. Un esempio è il modello Western Electric 555, utilizzato nel cinema sonoro e basato su un altoparlante a tromba, che amplificava il suono senza la necessità di grandi quantità di potenza.

Negli anni '40 e '50, l'attenzione si spostò verso la progettazione di cabinet in grado di controllare meglio la risposta in frequenza, soprattutto alle basse frequenze. Nel 1954 Edgar Villchur rivoluzionò la progettazione dei cabinet con l'invenzione della sospensione acustica. Questo design prevedeva un cabinet completamente chiuso e molto più compatto rispetto ai precedenti, in grado di riprodurre basse frequenze grazie all'uso di un woofer sospeso in aria all'interno del box. La riduzione delle dimensioni del cabinet senza compromettere la qualità sonora fu un grande passo avanti. Parallelamente alla sospensione acustica, si svilupparono i cabinet Bass-Reflex, che utilizzano un condotto o una porta per migliorare l'efficienza delle basse frequenze. Il sistema fu studiato da Albert Thuras negli anni '30, ma divenne popolare a partire dagli anni '60 grazie ai miglioramenti nella comprensione dell'acustica.

Con l'avvento di metodi di analisi più sofisticati, come l'uso di modelli matematici per prevedere il comportamento acustico dei cabinet, si cominciarono a progettare casse con criteri più rigorosi. Negli anni '70, Richard H. Small sviluppò i parametri Thiele/Small, una serie di costanti che permettono di progettare cabinet ottimizzati per qualsiasi driver, prevedendo le prestazioni acustiche in base alle proprietà meccaniche ed elettriche del

sistema. Questo modello rivoluzionò la progettazione dei cabinet, permettendo un maggiore controllo e precisione nel design. L'evoluzione delle casse multi-via, con cabinet progettati per ospitare driver separati per alte, medie e basse frequenze, divenne popolare negli anni '60 e '70. Ciò permise una migliore separazione delle frequenze e una maggiore accuratezza nella riproduzione del suono.

Negli anni '80, iniziò una fase di sperimentazione con nuovi materiali per i cabinet, come MDF (Medium-Density Fibreboard), plastica rinforzata e metalli leggeri, in grado di ridurre ulteriormente le risonanze e migliorare la qualità sonora. Verso la fine del XX secolo, le forme non rettangolari cominciarono a essere più comuni, con l'obiettivo di minimizzare le onde stazionarie e le riflessioni interne. Marchi come Bowers & Wilkins sperimentarono design curvilinei e forme innovative come nel caso della serie Nautilus.

### **La cassa chiusa**

La **cassa chiusa** è uno dei tipi più semplici di mobili per altoparlanti. Si tratta di un contenitore sigillato, con l'unica apertura destinata al woofer. Il suo scopo principale è separare la radiazione frontale, utile, da quella posteriore, che è in opposizione di fase. Confinando l'onda posteriore all'interno del mobile si evitano cancellazioni di fase, soprattutto alle basse frequenze.

Ogni altoparlante ha una propria *frequenza di risonanza* ( $F_S$ ), una *massa in movimento* ( $M_{MS}$ ) e delle *cedevolezza meccanica* ( $C_{MS}$ ) e *acustica* ( $C_{AS}$ ) delle sospensioni. Questi parametri influenzano la *curva di impedenza* del trasduttore, che in aria libera presenta un picco in corrispondenza di  $F_S$ . Anche il volume d'aria contenuto all'interno della cassa chiusa ha delle proprie cedevolezza meccanica ( $C_{MB}$ ) e acustica ( $C_{AB}$ ), che variano in proporzione al volume dell'involucro. Minore è il volume, maggiore sarà la rigidità complessiva del sistema, poiché le cedevolezza del woofer e dell'aria

sono assimilabili a delle capacità che si combinano in serie, con il risultato che la cedevolezza complessiva dell'intero sistema risulterà minore della più bassa tra le due in gioco.

In altre parole, l'aria contenuta nel box agisce come una molla applicata alla membrana del woofer, più robusta quanto è più è piccolo il volume interno del mobile.

### ***Dimensionamento del volume interno***

Il procedimento algebrico per calcolare il volume di una cassa chiusa utilizzando i *parametri Thiele/Small* è basato sulle proprietà meccaniche e acustiche dell'altoparlante.

La *frequenza di risonanza del trasduttore*  $F_S$  (Hz) rappresenta la frequenza alla quale il diaframma dell'altoparlante vibra naturalmente in aria libera. Lo spostamento della bobina mobile, quindi, è massimizzato quando viene applicato un segnale elettrico con frequenza  $F_S$ .

La *massa mobile*  $M_{MS}$  (grammi) è la massa complessiva di tutte le parti dell'altoparlante che si muovono insieme quando il trasduttore è in funzione (cono, bobina e carico d'aria che si muove con il diaframma). Questo parametro influenza direttamente la curva di impedenza dell'altoparlante, la quale presenta un picco pronunciato proprio in corrispondenza di  $F_S$ , dove l'impedenza del trasduttore aumenta notevolmente. Un altoparlante con una massa mobile elevata tende a essere meno efficiente nel rispondere rapidamente ai segnali ad alta frequenza.

$$F_S = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_{MS} \cdot C_{MS}}}$$

Il *fattore di merito totale*  $Q_{TS}$  è un parametro che descrive le caratteristiche di smorzamento di un altoparlante. Esso è esprimibile in funzione di  $Q_{ms}$  (*fattore di merito meccanico*) che rappresenta lo smorzamento della sospensione meccanica del woofer, e  $Q_{es}$  (*fattore di merito elettrico*) che

dipende dalla resistenza elettrica del trasduttore e dalle sue proprietà elettriche.

$$Q_{TS} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

La *cedevolezza totale del sistema* ( $C_T$ ) è data dalla combinazione della *cedevolezza meccanica del woofer* ( $C_{MS}$ ) e della *cedevolezza dell'aria all'interno della cassa* ( $C_{MB}$ ). Queste due cedevolezza si combinano in modo da comportarsi come un sistema in serie, quindi:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_{MS}} + \frac{1}{C_{MB}}$$

La *cedevolezza meccanica del woofer* è esprimibile come:

$$C_{MS} = \frac{1}{2\pi F_S Q_{TS}}$$

La *cedevolezza dell'aria* dipende dal *volume* della cassa ( $V$ ), dalla *densità dell'aria* ( $\rho$ , circa  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ) e dalla *velocità del suono* nell'aria ( $c$ , circa  $343 \text{ m/s}$ ):

$$C_{MB} = \frac{V}{\rho c^2}$$

Sostituendo  $C_{MS}$  e  $C_{MB}$  nell'equazione della cedevolezza totale  $C_T$  otteniamo:

$$\frac{1}{C_T} = 2\pi F_S Q_{TS} + \frac{\rho c^2}{V}$$

da cui otteniamo il volume come:

$$V = \frac{\rho c^2}{\frac{1}{C_T} - 2\pi F_S Q_{TS}}$$

### **Sistema Bass-Reflex**

Se ad una cassa completamente chiusa si pratica un'apertura (come nel caso del Bass-Reflex), la pressione interna diminuisce, permettendo all'aria racchiusa di "risuonare" a una frequenza specifica ( $F_B$ ) che dipende dalle

dimensioni dell'apertura, analogamente al comportamento di un risonatore di Helmholtz. Le due risonanze ( $F_S$  ed  $F_B$ ) interagiscono tra loro una volta che l'altoparlante è montato all'interno del mobile. Nel breve intorno di frequenze in cui questi due pistoni sono in fase tra loro, tendono entrambi a comprimere l'aria interna alla cassa ad ogni spostamento all'indietro del cono, mentre tendono a dilatarla per ogni spostamento in avanti dello stesso. Il risultato di questa interazione è la scomparsa dell'unico picco di impedenza, che appare scomposto in due picchi separati, posti rispettivamente sotto e sopra la frequenza  $F_B$ , ovvero a  $F_L$  e  $F_H$ .

Questa configurazione permette di ottenere una maggiore efficienza nel range di frequenze prossime a  $F_B$ , poiché l'aria in movimento attraverso il condotto contribuisce alla radiazione sonora del sistema, come se fosse un "secondo altoparlante". La progettazione del condotto reflex è cruciale per ottimizzare il comportamento del sistema: dimensioni troppo ridotte possono generare *turbolenze* indesiderate fino a far comportare il sistema come una cassa chiusa, mentre un'apertura troppo grande può portare a *interferenze* tra la radiazione anteriore e posteriore del cono.

La *frequenza di risonanza del sistema reflex* ( $F_B$ ) dipende da tre fattori fondamentali:

- Il *volume interno netto* ( $V_B$ ) della cassa, ovvero lo spazio utile al netto dei trasduttori, rinforzi strutturali e altri componenti interni.
- L'*area* ( $A$ ) del condotto o apertura.
- La *lunghezza del condotto*.

Per ottenere una frequenza di risonanza desiderata, la terna di questi valori deve essere ottimizzata; infatti, aumentando il volume interno della cassa o allungando il condotto  $F_B$  si abbassa, riducendo l'area dell'apertura o accorciando il condotto  $F_B$  si alza.

Poiché la *cedevolezza acustica delle sospensioni dell'altoparlante* ( $C_{AS}$ ) è direttamente proporzionale al suo *volume equivalente* ( $V_{AS}$ ), così come la

*cedevolezza dell'aria contenuta nel mobile* ( $C_{AB}$ ) è direttamente proporzionale al suo *volume interno*  $V_B$ , il *rapporto di cedevolezza*  $\alpha = C_{AS}/C_{AB}$  nel Bass-Reflex può venire espressa nella forma  $\alpha = V_{AS}/V_B$ . L'ottimizzazione di  $\alpha$  è essenziale per controllare il comportamento complessivo del sistema.

Le perdite nel sistema reflex influenzano il *fattore di merito complessivo* del diffusore  $Q_B$ , determinato da tre contributi principali:

- $Q_L$  è il fattore di merito risultante dalle perdite per *fessurazione*;
- $Q_A$  è il fattore di merito risultante dalle perdite per *assorbimento*;
- $Q_P$  è il fattore di merito risultante dalle perdite per *attrito nella porta*.

Maggiore è l'entità delle perdite, minore sarà il valore complessivo di  $Q_B$ , il quale è calcolato come

$$\frac{1}{Q_B} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_P} + \frac{1}{Q_A}.$$

Un sistema reflex ideale, privo di perdite, sarebbe caratterizzato da  $Q_B$  infinito. Nella realtà, i diffusori Bass-Reflex sono tutti caratterizzati da un proprio valore di  $Q_B$ , tanto più piccolo quanto maggiore è l'entità delle perdite totali del sistema.

In linea di massima, si hanno perdite contenute (più alti valori di  $Q_B$ ) con diffusori piccoli, perdite più elevate (più bassi valori di  $Q_B$ ) nei sistemi di grandi dimensioni.

### **Simulazione**

La simulazione del cabinet in VituixCAD è un processo fondamentale per ottimizzare le prestazioni acustiche di un sistema di altoparlanti, utilizzando il tool Enclosure per definire le caratteristiche del cabinet, come il volume interno e la frequenza di risonanza. Dopo questa fase, si procede con la simulazione 3D in Autodesk Fusion, che permette di visualizzare e analizzare la struttura fisica della cassa.

Successivamente, il tool Diffraction di VituixCAD consente di valutare gli effetti delle riflessioni e delle diffrazioni del suono, causati dalla geometria del cabinet e dalla disposizione dei driver. Infine, con il tool Merger, si integrano le risposte in frequenza dei vari driver e del cabinet, valutando l'interazione tra le componenti e ottimizzando la risposta complessiva.

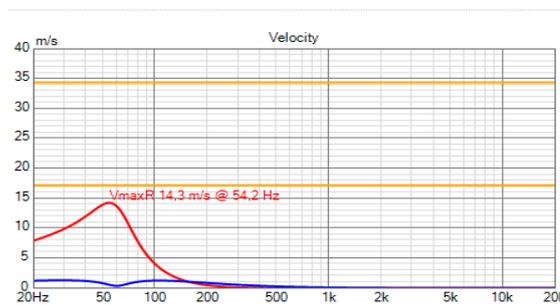
### ***Enclosure***

La frequenza di accordo  $F_B$  in un sistema Bass-Reflex è spesso scelta in prossimità di  $F_s$ , ma può essere leggermente inferiore o superiore a seconda della risposta in frequenza desiderata.

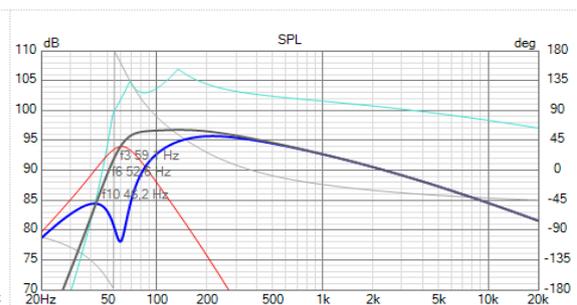
Inseriti i parametri Thiele-Small di woofer e tweeter in *Tabella 1*, procedo con l'inserimento dei parametri del cabinet Bass-Reflex.

Inizialmente, ho impostato il sistema in corrente con una potenza di **10 W** per effettuare la simulazione, stimando un volume del cabinet pari a **7,50 litri** al fine di mantenerlo compatto. Partendo da una *frequenza di accordo* ( $F_B$ ) uguale alla *frequenza di risonanza* ( $F_s$ ), ho iniziato ad analizzare i grafici forniti dall'applicativo.

Per garantire una ventilazione adeguata e sostenere la radiazione frontale senza causare turbolenze, ho aumentato il diametro del condotto reflex, avvicinandomi al limite critico che segnala l'inizio delle turbolenze, ma senza superarlo (*fig. 5*).



*fig. 5 Velocità dell'aria*

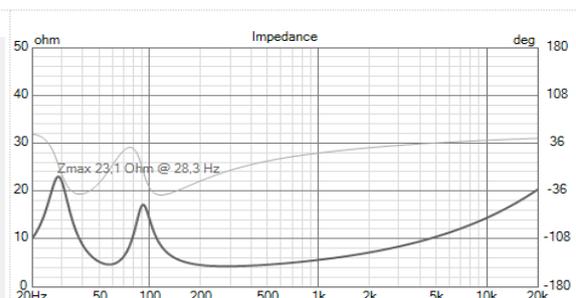


*fig. 6 Risposta SPL cabinet Bass-Reflex*

In seguito, ho cercato di ottimizzare la risposta in **SPL** (*Sound Pressure Level*), poiché una frequenza di  $F_B$  così bassa portava a un avvallamento nella risposta in frequenza. Pertanto, ho deciso di aumentarla fino a **60 Hz**. Desiderando realizzare un cabinet di forma cubica con un volume di **7,50 litri**, ho considerato la profondità del mobile e le disponibilità di tubi per Bass-Reflex sul mercato, trovando il compromesso nel *Tubo in polistirene PTD43L123* da 43x123mm. Ho quindi modificato le dimensioni del tubo reflex (*fig. 7*), stabilendo un diametro di **4,3 cm** e una lunghezza di **12,3 cm**.

|                                  |      |                                    |      |
|----------------------------------|------|------------------------------------|------|
| <b>Box Rear 1</b>                |      | <b>Vent Rear 1</b>                 |      |
| Volume [l]                       | 7,50 | Length [cm]                        | 12,3 |
| Qa                               | 56   | <input type="checkbox"/> Diam [cm] | 4,3  |
| Ql                               | 7,5  | Qp                                 | 100  |
| <input type="checkbox"/> Fb [Hz] | 60,0 | Number                             | 1    |

*fig. 7 Dimensioni cabinet e Tubo reflex*



*fig. 8 Risposta in impedenza del cabinet*

Nel grafico dell'**impedenza** in *fig. 8*, possiamo notare due picchi distinti in corrispondenza delle frequenze  $F_L$  (frequenza più bassa), ed  $F_H$  (frequenza più alta) come previsto per i sistemi Bass-Reflex. La  $F_s$  dell'altoparlante si trova a metà strada tra  $F_L$  e  $F_H$  e corrisponde al punto di *minima impedenza*, dove l'interazione tra il driver e il condotto è ottimizzata.

A questo punto, ho esportato i dati relativi a **SPL** e **impedenza (Z)** per l'implementazione nel tool **Diffraction** (a pagina 36).

### **Autodesk Fusion**

Dopo aver definito le caratteristiche del cabinet con il tool **Enclosure** di VituixCAD e simulato la risposta acustica del sistema, è essenziale verificare che le misure fisiche del progetto siano corrette. Questo passaggio viene effettuato con la simulazione 3D in **Autodesk Fusion**.

fig. 9 Parametri dimensionali del cabinet

|                      |    |                |        |
|----------------------|----|----------------|--------|
| Volume               | l  | ( Altezza -... | 7.83   |
| Altezza              | mm | 215 mm         | 215.00 |
| Larghezza            | mm | 215 mm         | 215.00 |
| LegnoSpessore        | mm | 12 mm          | 12.00  |
| Profondità           | mm | 190 mm         | 190.00 |
| ProfonditàBassReflex | mm | 123.4 mm       | 123.40 |

fig. 10 Misure del pannello frontale

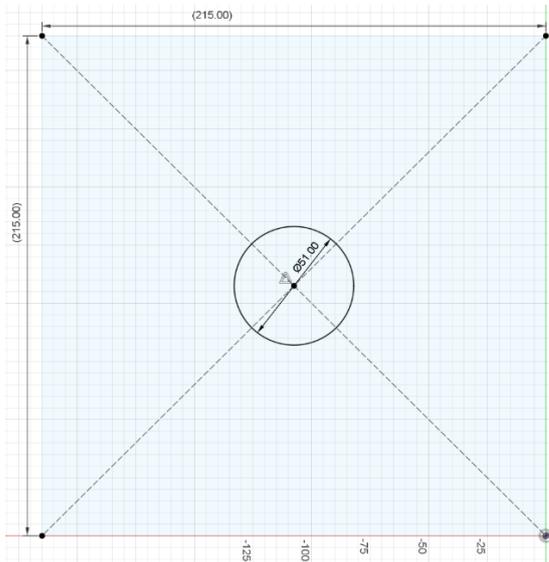
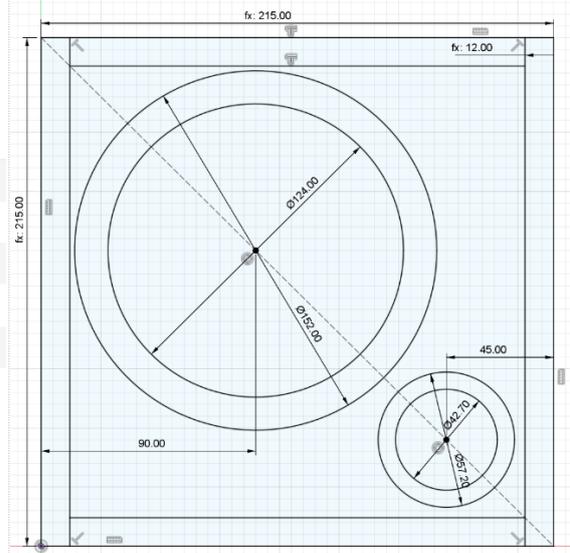


fig. 11 Misure del pannello posteriore

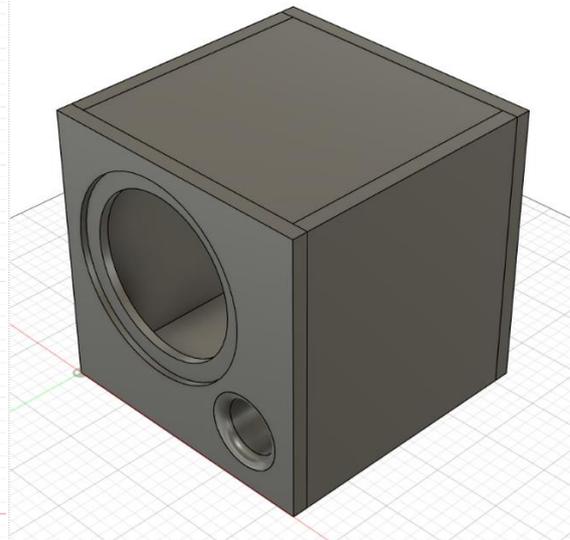


fig. 12 Simulazione cabinet in 3D

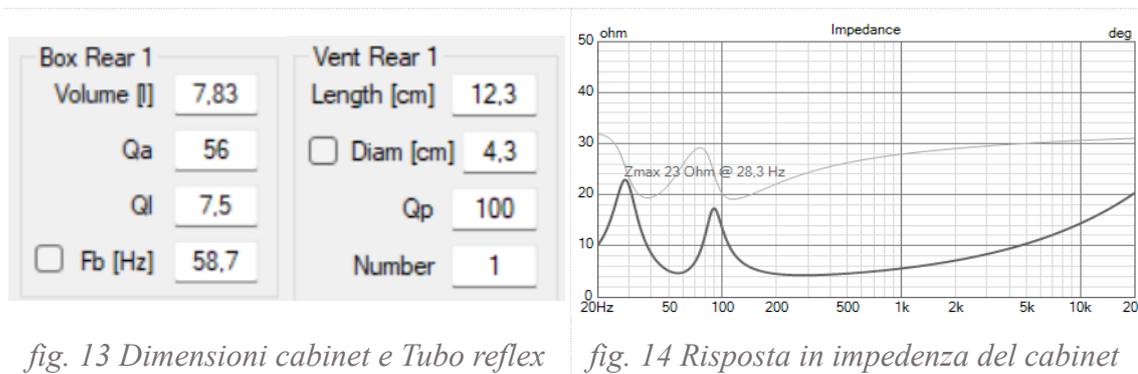
In questa fase, si inseriscono i dati relativi alle dimensioni e alla struttura del cabinet nel software di modellazione 3D per eseguire una simulazione accurata. Autodesk Fusion permette di visualizzare il progetto in modo tridimensionale e controllare che tutte le parti del cabinet – inclusi i fori per i driver e il condotto Bass-Reflex – siano progettati con precisione.

Verificando le misure con Fusion, si può inoltre valutare lo spazio occupato dal trasduttore e dalla porta Reflex, verificando le dimensioni del pannello

frontale, e che il posizionamento del condotto Bass-Reflex non crei interferenze con altre parti del cabinet.

Grazie al software ho calcolato le corrette dimensioni del cabinet, che variano leggermente per facilitare il dimensionamento dei pannelli in fase di taglio.

Determinate le dimensioni del pannello frontale (**21.5 x 21.5 cm**) in base alla superficie occupata dal trasduttore e dal condotto reflex, ho calcolato una profondità interna pari a **19.0 cm**, ottenendo un volume pari a **7.83 litri** che porta una variazione non rilevante di  $F_B$  a 58,7 Hz (*fig. 13*), tenendo costanti le dimensioni del condotto Reflex.



*fig. 13 Dimensioni cabinet e Tubo reflex*

*fig. 14 Risposta in impedenza del cabinet*

### ***Diffraction***

La **diffrazione** è un fenomeno fisico che avviene quando un'onda sonora incontra un ostacolo, come il bordo di un diffusore o la superficie frontale di un cabinet. Quando il suono emesso dall'altoparlante raggiunge il bordo del cabinet, parte dell'energia viene riflessa, mentre l'altra parte continua a propagarsi. Questo comportamento genera delle onde diffratte che possono alterare la risposta sonora, soprattutto nelle frequenze medio-alte, causando interferenze costruttive o distruttive.

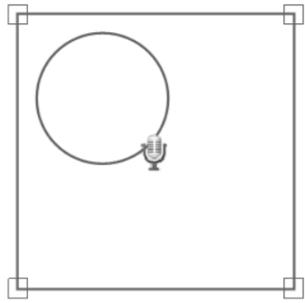


fig. 15 Cabinet simulato in Diffraction

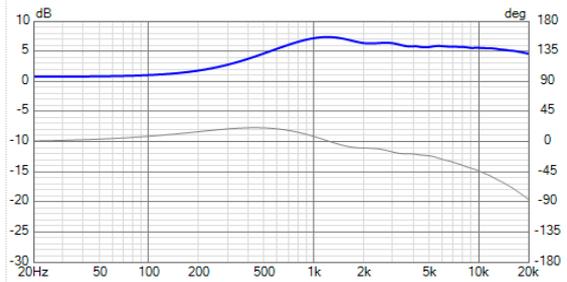


fig. 16 Risposta di diffrazione del cabinet

Nel tool **Diffraction** si inseriscono le dimensioni e la geometria del cabinet, nonché la posizione dei driver sulla superficie frontale (fig. 15). La simulazione fornisce una rappresentazione grafica (fig. 16) come le onde sonore reagiscono agli spigoli, alla forma e alle dimensioni del cabinet.

fig. 17 Diffrazione con woofer in asse

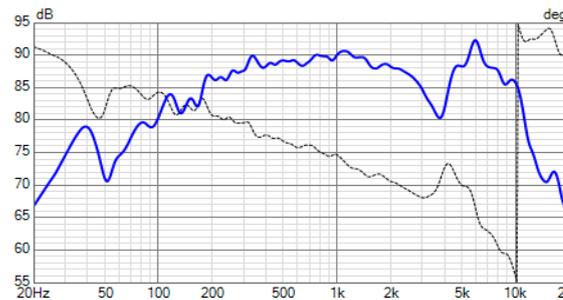


fig. 18 Diffrazione con woofer a 20°

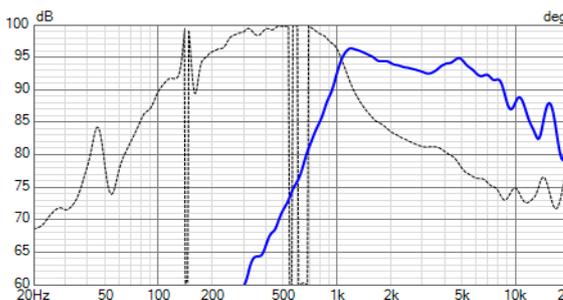
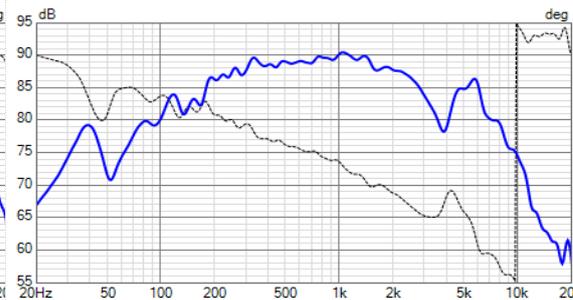
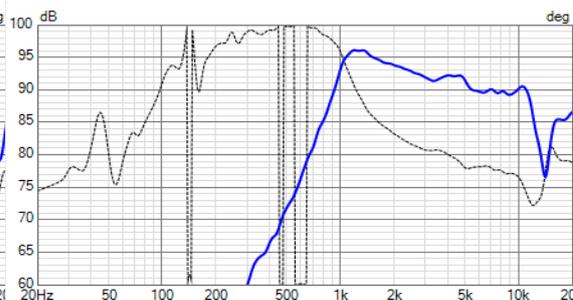


fig. 19 Diffrazione con tweeter in asse

fig. 20 Diffrazione con tweeter a 20°

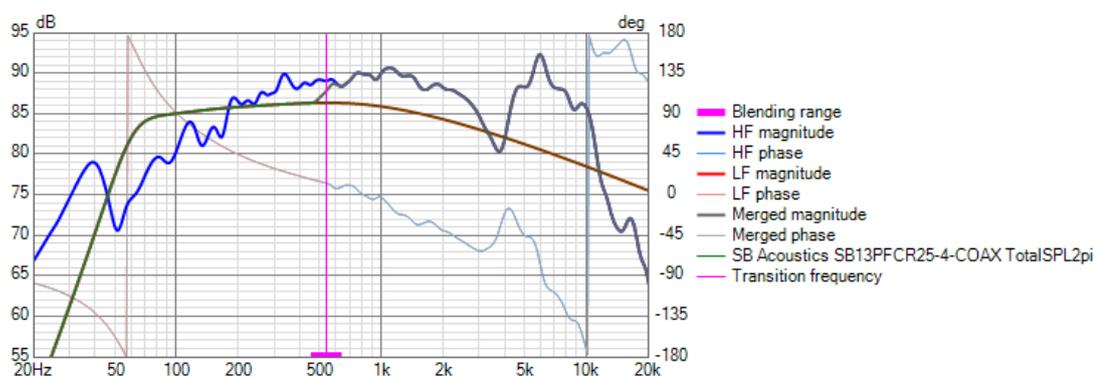


Inserendo i dati SPL del woofer e del tweeter in asse e a 20° è possibile ottenere i grafici delle variazioni nella risposta in frequenza causate dalla diffrazione, mostrando eventuali irregolarità nella propagazione del suono. Precisando che questi grafici non tengono conto della presenza del condotto Bass-Reflex, notiamo come la risposta SPL del woofer mostri significative

variazioni oltre i 2500 Hz, mentre il tweeter viene linearizzato maggiormente con un ascolto a 20° fuori asse.

### **Merger**

Il tool **Merger** in VituixCAD è utilizzato per combinare le risposte in frequenza dei vari driver e del cabinet di un sistema di diffusori acustici. La sua funzione principale è quella di fornire un'analisi complessiva delle prestazioni sonore del sistema, integrando le risposte dei tweeter, woofer ed eventuali altri trasduttori.



*fig. 21 Diffrazione con woofer in asse*

Consente infatti di sommare le risposte in frequenza dei diversi driver, mostrando come si sovrappongono e interagiscono; fornisce informazioni sulla fase, aiutando a comprendere come i driver si comportano in relazione l'uno all'altro nel dominio temporale.

Impostato lo *Sphere baffle step* a **535 Hz** ( $115/L$  dove: 115 è 1/3 della velocità del suono ed L è la larghezza del pannello frontale pari a 0.215 m) e importati i dati precedentemente esportati dai tool **Enclosure** e **Diffraction** si procede a impostare il selettore di filtro sempre a 535 Hz, ottenendo il grafico in fig. 21, ed esportando in FRD.

### 3. Progettazione del Filtro Crossover

Nella progettazione di un sistema di diffusori acustici, il filtro crossover è essenziale per garantire una riproduzione sonora equilibrata su tutte le frequenze. Il suo compito è dividere il segnale audio in bande di frequenza, inviandole ai trasduttori appropriati (woofer, midrange, tweeter), ottimizzando così la risposta in frequenza e migliorando la qualità dell'ascolto.

La progettazione di un filtro crossover richiede un approccio teorico e pratico, basato sulla comprensione delle caratteristiche elettriche e acustiche dei trasduttori. La scelta della frequenza di crossover, la topologia del filtro (primo, secondo, terzo ordine, ecc.) e la configurazione dei componenti passivi (induttori, condensatori, resistori) sono fondamentali per determinare il comportamento del sistema.

In questo capitolo si illustrerà la progettazione di un filtro crossover a due vie per il progetto **Coatta®**. Si esamineranno i parametri per il calcolo del dimensionamento dei componenti, con le simulazioni con VituixCAD che permetteranno l'analisi della risposta in frequenza, impedenza e fase acustica per determinare una corretta *frequenza di crossover*, sottolineando l'importanza del filtro nell'ottimizzazione delle prestazioni del sistema.

#### ***Risposta SPL***

Nel caso dei driver scelti, i dati preliminari derivati dall'analisi della risposta del tweeter e del woofer permettono di determinare una frequenza di crossover uguale o superiore ai **2 kHz**, la quale rientra perfettamente nell'intervallo consigliato di crossover che si estende dai 2 kHz ai 3 kHz.

Incrociando le risposte in frequenza dei due trasduttori scelti, possiamo notare che il livello di sensibilità del tweeter è superiore a quello del woofer,

dettaglio che è possibile osservare anche in *Tabella 1*, che annotano la differenza di sensibilità si attesta intorno a 1dB; pertanto, è da ipotizzare l'inserimento di una resistenza applicata in serie al tweeter.

### ***Risposta in impedenza***

È fondamentale condurre un'analisi accurata del comportamento dell'impedenza in funzione della frequenza, poiché potrebbe manifestare comportamenti anomali a specifiche frequenze, comunemente picchi in corrispondenza della frequenza di risonanza  $F_s$ ; ci aspettiamo che il tweeter possa presentare un picco a una frequenza elevata, mentre il woofer tende a mostrare picchi a frequenze più basse, come si evince dalla *Tabella 1*. In questi casi, è possibile intervenire in modo analogo a quanto fatto in precedenza, eliminando le anomalie o adottando soluzioni che garantiscano che l'impedenza misurata ai capi del crossover non sia influenzata dalle caratteristiche impedenziali dello stesso crossover. La correzione della linearità della risposta in impedenza risulta inoltre ottimale per evitare comportamenti anomali del woofer, che potrebbero causare problemi sia in termini di qualità d'ascolto, con distorsioni o irregolarità nella risposta in frequenza, compromettendo la linearità del sistema e minando la precisione e la naturalezza della riproduzione sonora; sia in termini di efficienza meccanica ed elettrica del driver, causando un carico non uniforme sull'amplificatore, che potrebbe dover gestire picchi o cali di corrente indesiderati, con il rischio di sovraccaricare il sistema in casi estremi.

Possiamo notare in *fig. 22* come la risposta impedenziometrica del tweeter presenti un lievissimo picco in corrispondenza di  $F_s$  (**1300 Hz**), non interagendo significativamente quindi con il crossover; l'impedenza del woofer in *fig. 23*, invece, presenta due picchi equidistanti da  $F_s$  (**43 Hz**) a **23** e **80  $\Omega$** , derivanti dalla presenza del Bass-Reflex come già spiegato a *pagina 34*. Tale risposta risulta assolutamente standard nei woofer.

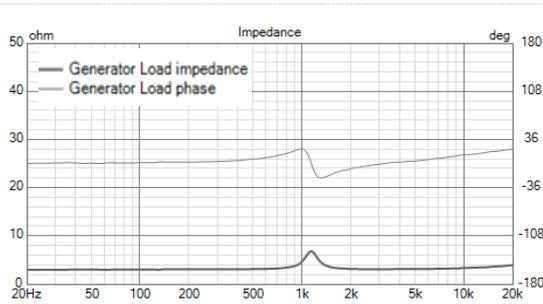


fig. 22 Risposta in impedenza del tweeter

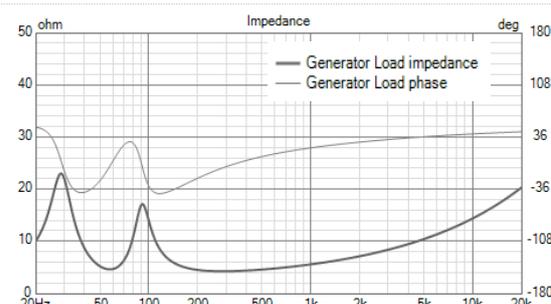


fig. 23 Risposta in impedenza del woofer

In prima osservazione, possiamo notare come  $F_L$  ed  $F_H$  e relativi picchi di impedenza non influenzeranno in alcun modo il comportamento del filtro crossover, in quanto si trovano ad una frequenza sostanzialmente inferiore ai **2 kHz** precedentemente ipotizzati; La minore efficienza del woofer e il rischio di peggioramento della definizione sonora nelle vicinanze di  $F_L$  ed  $F_H$  suggeriscono la necessità di progettare un filtro che ottimizzi le condizioni operative del woofer. Autonomamente  $F_H$  genera un lievissimo avvallamento a **90 Hz** non rilevante, mentre  $F_L$  non genera evidenti variazioni nella risposta SPL, ma il sistema dei due picchi di risonanza genera un avvallamento in corrispondenza di  $F_s$  potrebbe sollecitare anomalie.

A tal fine, si potrebbe considerare la costruzione di un filtro passa-alto, per limitare l'intervento del woofer al di sopra di  $F_s$ , evitando sovraccarichi e migliorando la risposta complessiva del sistema.

Un'altra caratteristica tipica dei woofer è la rampa di impedenza verso le frequenze più alte, che può essere risolta con una *Rete di Zobel o antinduttiva* (circuito **RC**, costituito da un condensatore e una resistenza da **8 Ω** in serie tra loro e in parallelo tra il filtro e il midrange), per stabilizzare l'impedenza e migliorare il comportamento del woofer alle alte frequenze. Dal grafico in fig. 23 possiamo evincere che tale rampa non supera di 10 ohm nell'intorno della ipotizzata frequenza di crossover; quindi, tale rete non è da applicare.

## Filtro crossover

Date le analisi e le correzioni delle risposte in frequenza SPL ed impedenza, possiamo imporre senza troppe difficoltà la frequenza di crossover  $F_s$  a 2 kHz come inizialmente ipotizzato. Per separare le gamme di frequenze gestite dai diversi altoparlanti possiamo progettare due filtri del terzo ordine: un filtro passa-alto applicato al tweeter e un filtro passa-basso applicato al woofer.

Un filtro crossover di **terzo ordine** ha una pendenza di 18 dB per ottava e utilizza tre componenti (due induttori e un condensatore per un filtro passa-basso, o due condensatori e un induttore per un filtro passa-alto).

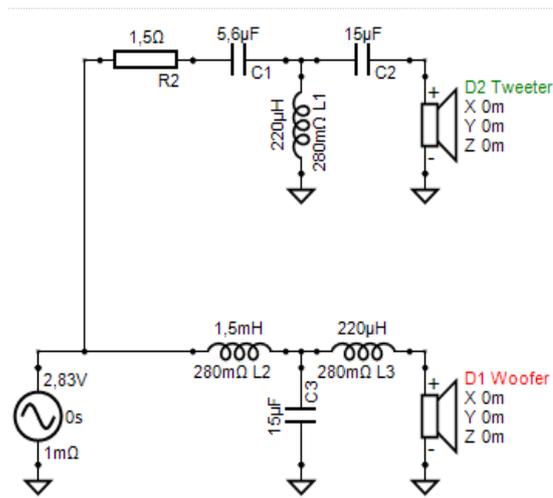


fig. 24 Filtro crossover

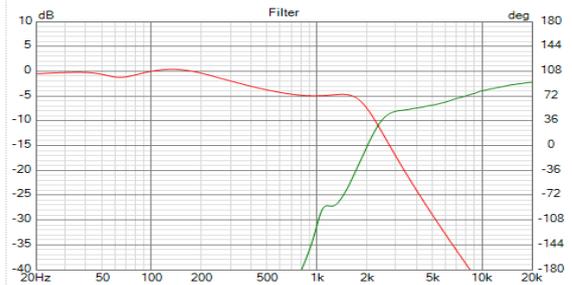


fig. 25 Risposta in frequenza del crossover

Dopo calcoli e tentativi nel dimensionamento dei componenti ho ottenuto il filtro crossover in fig. 24, che presenta componenti con risposta SPL (fig. 26) piuttosto lineare nell'intorno della  $F_C$

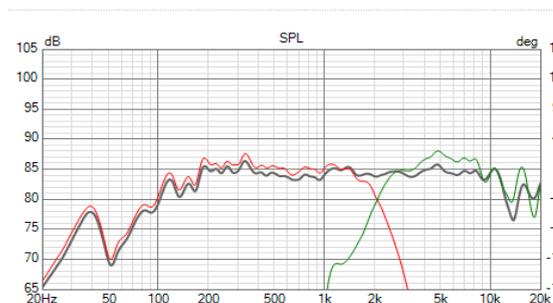


fig. 26 Risposta SPL con crossover

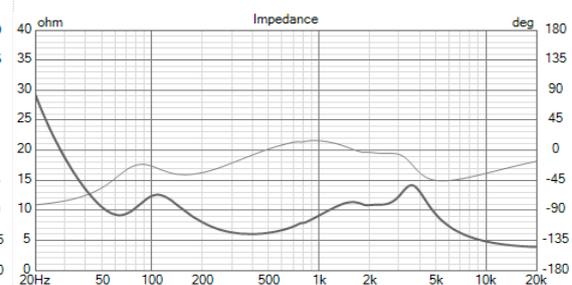


fig. 27 Risposta in impedenza del sistema

## 4. Costruzione prototipo

L'assemblaggio della cassa acustica coassiale **Coatta** rappresenta una fase cruciale nella progettazione e realizzazione di un diffusore sonoro ad alte prestazioni. Questo processo richiede un approccio metodico, in cui la precisione e l'attenzione ai dettagli sono fondamentali per garantire che ogni componente lavori in sinergia con gli altri, ottimizzando così l'efficienza e la qualità del suono.

Il punto di partenza è la scelta dei materiali per il cabinet. L'impiego di legno **MDF** con uno spessore di **12 mm** viene preferito per le sue eccellenti proprietà acustiche, in quanto offre una buona resistenza alle vibrazioni e contribuisce a minimizzare le risonanze interne. Il design compatto della cassa è stato studiato per sfruttare al massimo lo spazio ridotto, con particolare attenzione all'assorbimento acustico e alla dispersione del suono.

### **Cabinet**

La preparazione del legno per la realizzazione della cassa acustica *Coatta*® rappresenta una fase fondamentale per garantire sia l'integrità strutturale che la resa acustica del diffusore. Il primo passo consiste nel dimensionamento e nel taglio dei pannelli, eseguito con precisione per ottenere un cabinet compatto e resistente, capace di minimizzare le vibrazioni indesiderate. I pannelli di MDF, dello spessore di 12 mm, sono ricavati secondo le misure previste dal progetto in *fig. 29* e *fig. 30*.

Una volta tagliati i pannelli, si procede al **dimensionamento e alla realizzazione dei fori** sul pannello anteriore (in *fig. 29*) per l'alloggiamento del driver coassiale **SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX** (in *fig. 28*) e per il condotto Bass-Reflex **Tubo in polistirene PTD43L123<sup>(1)</sup> da 43x123mm** frontale. I fori devono essere eseguiti con estrema accuratezza,

utilizzando utensili specifici come seghe a tazza o frese, per garantire un montaggio perfetto degli altoparlanti e del tubo di accordo reflex.

fig. 28 Misure del driver coassiale SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX

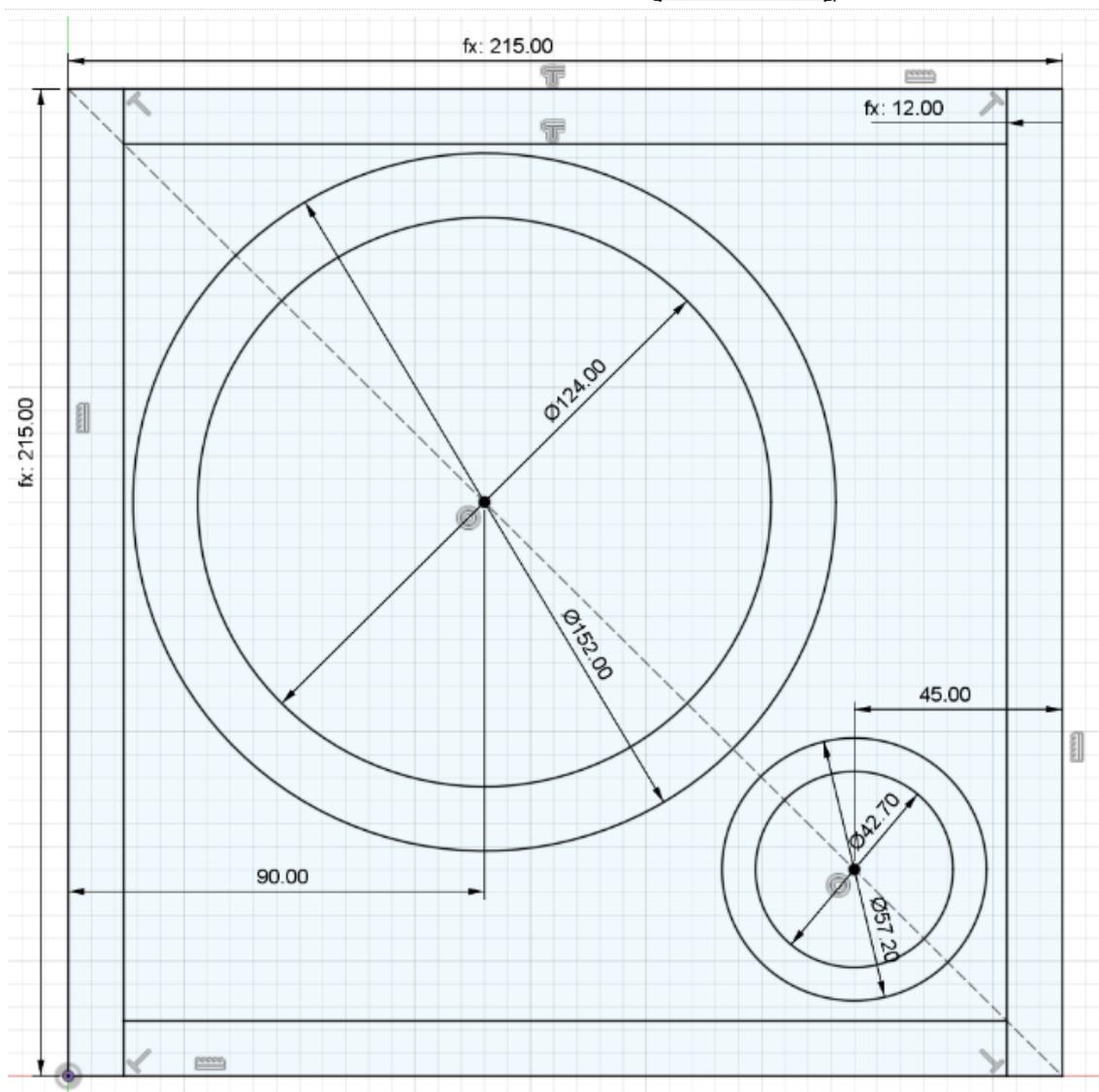
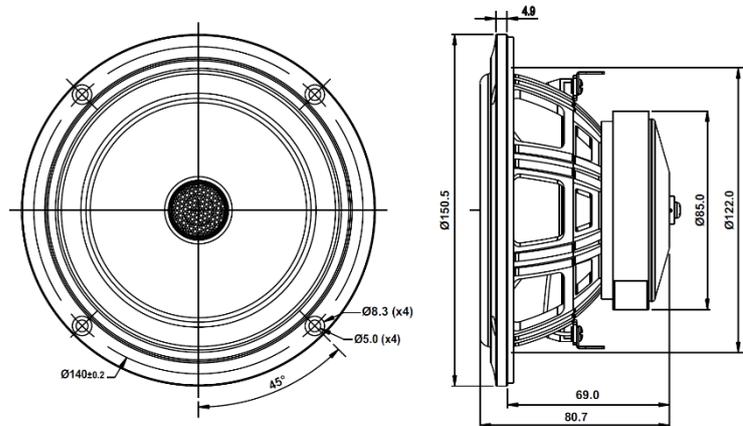
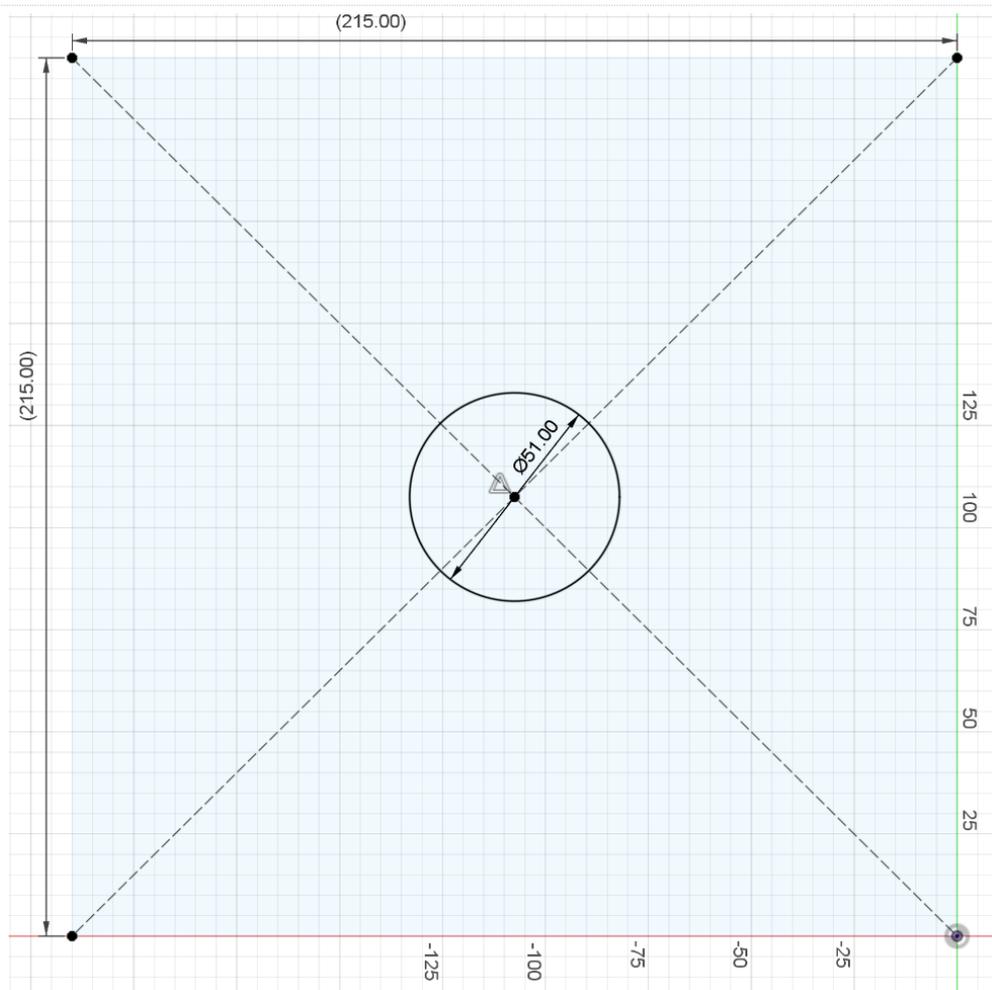


fig. 29 Misure del pannello frontale

Il foro per il driver coassiale deve essere esattamente del diametro dell'altoparlante, così da consentire una perfetta aderenza e una corretta sigillatura attorno al bordo. Inoltre, va effettuata una scanalatura profonda **5mm** per l'alloggiamento del frontale con i fori per le viti.

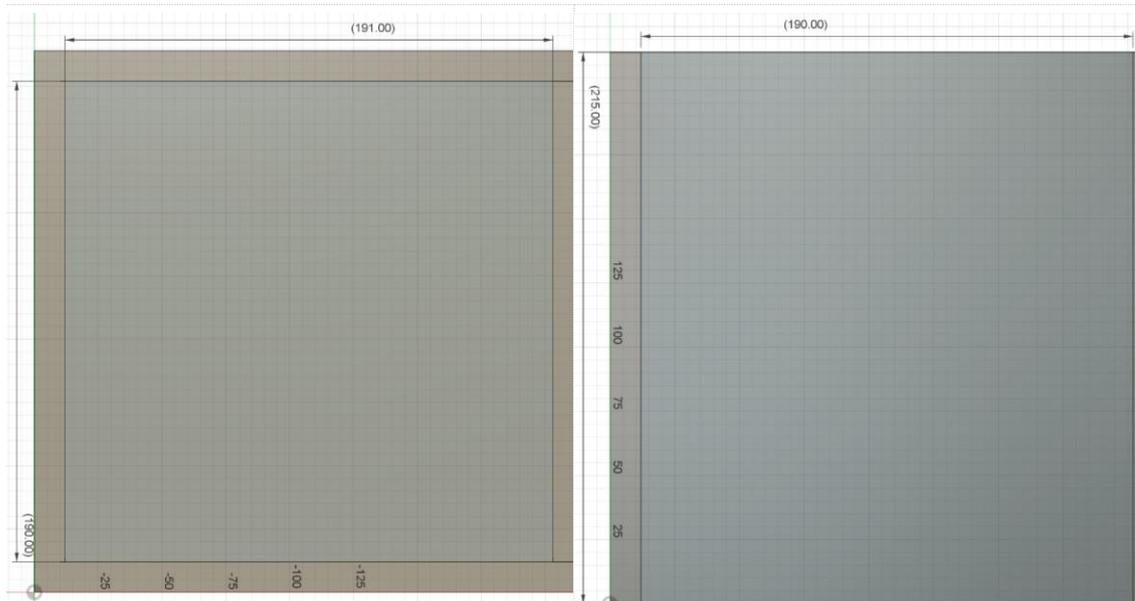
Anche il foro per il Bass-Reflex viene calcolato in funzione delle dimensioni del tubo reflex utilizzato, in modo da ottimizzare il flusso d'aria e la risposta delle basse frequenze.

Sul **pannello posteriore** in *fig. 30*, viene praticato il foro per l'installazione della vaschetta dei connettori. Anche in questo caso, è fondamentale rispettare le misure della vaschetta per garantire un'installazione a filo e facilitare la connessione dei cavi, assicurando che non ci siano spazi vuoti o fessure che possano compromettere l'ermeticità del diffusore.



*fig. 30 Misure del pannello posteriore*

Le dimensioni pannelli superiore e inferiore (di eguali dimensioni) e i due pannelli laterali, indicate nelle *fig. 31* e *fig. 32*, dipendono direttamente dalle misurazioni e quindi dal dimensionamento del cabinet a pagina 35.

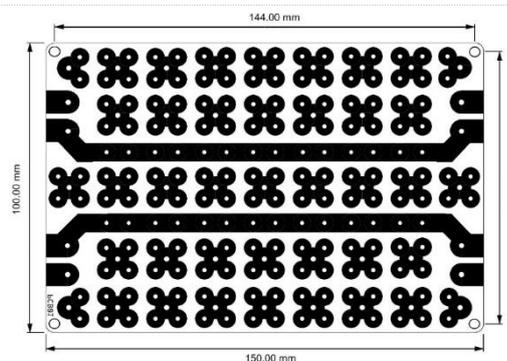


*fig. 31* Misure del pannello superiore

*fig. 32* Misure del pannello laterale

### **Filtro crossover**

Una volta completata la lavorazione del legno e realizzati tutti i fori, si passa all'**assemblaggio del filtro crossover**, che rappresenta il cuore della gestione delle frequenze tra il woofer e il tweeter. I componenti del filtro del terzo ordine, le cui caratteristiche sono esplicitate in *Tabella 2*, viene montato su una basetta **Audikom PCB01**<sup>(2)</sup> di 10x15 cm in *fig. 33*, con i componenti (induttori, condensatori e resistenze) saldati in modo sicuro e ordinato.



*fig. 33* Audikom PCB01

Una volta assemblato, il crossover viene fissato all'interno del cabinet, su un lato interno, lontano dalle vibrazioni dirette generate dal driver coassiale in una posizione che garantisca sia la stabilità meccanica che la riduzione di eventuali interferenze elettromagnetiche.

*Tabella 2 Componenti filtro crossover*

| N° | componente  | dim.                  | modello                      |
|----|---|-----------------------|------------------------------|
| 2  | Condensatore elettrolitico non polarizzato <sup>3</sup> | 1.50 $\mu$ F<br>100 V | Audikom CE001.50<br>SL       |
| 1  | Condensatori Poliestere (MKT) <sup>4</sup>              | 5.60 $\mu$ F<br>250 V | Audikom CZT001.50            |
| 2  | Induttore in Aria Termosaldata <sup>5</sup>             | 0.22 mH<br>0.6 mm     | Jantzen Audio<br>BBA0600.220 |
| 1  | Induttore in Permite Termosaldata <sup>6</sup>          | 1.50 mH<br>0.8 mm     | Jantzen Audio<br>BBF0801.500 |
| 1  | Resistore Wirewound su cassa ceramica <sup>7</sup>      | 1.50 $\Omega$<br>10 W | Jantzen Audio<br>RR10001.50  |

### **Rivestimento interno**

Una volta assemblata la struttura in legno, e prima del montaggio definitivo dei componenti interni, viene posizionato del materiale fonoassorbente e smorzante per ottimizzare la risposta acustica complessiva del diffusore.

Il materiale fonoassorbente, spesso in forma di **pannelli di lana di vetro, lana di roccia, schiuma acustica** o altri materiali fibrosi ad alta densità, viene applicato alle pareti interne della cassa. Nel caso di Coatta ho scelto il **CTK Caimat 8 adesivo**, per assorbire le onde sonore che si riflettono all'interno del diffusore, riducendo l'effetto delle onde stazionarie che potrebbero causare risonanze indesiderate. Queste risonanze, se non controllate, possono interferire con la chiarezza della riproduzione sonora, in particolare nelle medie e basse frequenze, creando un effetto di "rimbombo" o una colorazione del suono.

In una cassa coassiale compatta come la Coatta, il materiale viene spesso disposto in modo da coprire uniformemente le pareti laterali, superiore e inferiore. Tuttavia, si evita di riempire completamente il cabinet, soprattutto

nelle vicinanze del condotto del Bass-Reflex, per non ostacolare il corretto flusso d'aria necessario per il funzionamento del reflex. Anche la parte anteriore, dove è installato il driver coassiale, viene lasciata libera da materiale assorbente.

In aggiunta al materiale fonoassorbente, si utilizza spesso anche materiale smorzante per ridurre le vibrazioni dei pannelli stessi del cabinet. Questo può includere **bitume autoadesivo** o **manti smorzanti**, come il **CTK Practic New** a base di gomma e polimeri applicato sulle superfici interne dei pannelli di Coatta per ridurre al minimo la trasmissione delle vibrazioni generate dal movimento del woofer. Le vibrazioni possono influenzare negativamente la qualità del suono, in particolare nelle basse frequenze, generando distorsioni. Lo smorzamento contribuisce a rendere il cabinet più "inerte", ovvero meno incline a vibrare in risposta alle onde sonore interne, migliorando così la precisione e la chiarezza del suono.

### **Componenti interni**

Il **posizionamento degli altri componenti** segue la stessa logica: il driver coassiale viene fissato al pannello anteriore con viti, assicurandosi che sia ben saldo e che non vi siano spazi tra il bordo del driver e il legno. Il Bass-Reflex frontale, anch'esso installato in maniera precisa, deve essere sigillato correttamente per evitare perdite d'aria indesiderate.



*fig. 34 Jantzen Audio - PTD43L123*



*fig. 35 Vaschetta in ABS VS01*

La vaschetta dei connettori (fig. 35), posta sul pannello posteriore, viene saldamente fissata, e i cavi del crossover vengono collegati con cura per assicurare una connessione elettrica efficiente.

Infine, è essenziale garantire la **chiusura ermetica** della cassa. Qualsiasi fessura o spazio tra i pannelli può influire negativamente sulla risposta acustica del diffusore, causando perdite di pressione interna e alterando il comportamento del Bass-Reflex. Per prevenire ciò, i bordi dei pannelli vengono incollati con colle specifiche per il legno e sigillati con materiali come silicone o guarnizioni adesive, creando una barriera che impedisce il passaggio dell'aria. Questa ermeticità è fondamentale per mantenere il corretto funzionamento del Bass-Reflex e per evitare che si generino rumori o distorsioni dovute a vibrazioni indesiderate.

In conclusione, la preparazione del legno e l'assemblaggio accurato dei componenti garantiscono che la cassa *Coatta*® non solo sia esteticamente solida, ma anche acusticamente performante, offrendo una riproduzione sonora chiara e priva di anomalie.

---

## Appendice

<sup>1</sup> **Jantzen Audio - PTD43L123** è un tubo di accordo esponenziale per Bass-Reflex in polistirene, di colore nero, a norma UL94 class HB.

Dimensioni: Ø = 43mm; L = 123mm.

<sup>2</sup> **Audikom PCB01** è stato progettato per la prototipazione e l'assemblaggio dei filtri crossover. Le basette Audikom sono state pensate per semplificare notevolmente l'assemblaggio di un filtro crossover, poiché dotate di forature adatte alle dimensioni notevoli dei reofori di induttori e condensatori, oltre che di piazzole a quadrifoglio per poter connettere più componenti tra loro senza dover creare "ponticelli". PCB01 ha una dimensione di *10x15 cm* e consente l'assemblaggio di un filtro di piccole dimensioni. Il PAD è costituito da 4 piazzole con un foro da 1.2mm ed una centrale con foro da

---

1.6mm per consentire l'interconnessione di più componenti senza dover realizzare ponticelli. È possibile anche connettere due o più componenti, se non sono nello stesso PAD, utilizzando i reofori dei componenti stessi per cortocircuitare i vari PAD. Tutti i PAD sono pre-stagnati con stagno all'argento per garantire la massima facilità nella saldatura e la massima conducibilità. Le piazzole di ingresso e uscita prevedono l'installazione di un morsetto di alta qualità o la possibilità di saldare un cavo.

<sup>3</sup> Il **condensatore** è un componente elettronico che immagazzina e rilascia energia elettrica. Esistono diverse tipologie, tra cui i **condensatori elettrolitici** e quelli in **poliestere (MKT)**.

I **condensatori elettrolitici** hanno una maggiore capacità per dimensioni ridotte, ma sono polarizzati; quindi, devono essere collegati con la giusta polarità (positivo e negativo). I condensatori **elettrolitici non polarizzati**, sono ottenuti collegando due condensatori elettrolitici **polarizzati** in serie, con i terminali opposti collegati tra loro, e la capacità totale risultante sarà dimezzata rispetto a quella di ciascun condensatore individuale.

<sup>4</sup> Il **condensatore** è un componente elettronico che immagazzina e rilascia energia elettrica. Esistono diverse tipologie, tra cui i **condensatori elettrolitici** e quelli in **poliestere (MKT)**.

I **condensatori in poliestere (MKT)** non sono polarizzati; quindi, possono essere collegati in qualsiasi direzione. Sono più stabili e affidabili rispetto agli elettrolitici, specialmente a lungo termine, e vengono spesso utilizzati in applicazioni audio per la loro buona qualità sonora e resistenza alle alte frequenze.

<sup>5</sup> L'**induttore** è un componente che immagazzina energia sotto forma di campo magnetico quando una corrente lo attraversa. La sua capacità di opporsi alle variazioni di corrente si chiama **induttanza**.

---

Gli **induttori in aria** non hanno un nucleo magnetico, solo una bobina di filo. Sono meno soggetti a distorsioni, ma hanno induttanze più basse e richiedono più spazio per ottenere valori elevati.

<sup>6</sup> L'**induttore** è un componente che immagazzina energia sotto forma di campo magnetico quando una corrente lo attraversa. La sua capacità di opporsi alle variazioni di corrente si chiama **induttanza**.

Gli **induttori in ferrite (Permite)** utilizzano un nucleo in materiale ferromagnetico, come la ferrite, che aumenta l'induttanza rispetto agli induttori in aria, rendendoli più compatti. Tuttavia, possono saturarsi a correnti elevate e introdurre distorsioni.

<sup>7</sup> Il **resistore** è un componente elettronico che oppone resistenza al passaggio della corrente elettrica, convertendo l'energia elettrica in calore. Viene usato per controllare i livelli di corrente e tensione nei circuiti.

Il **resistore Wirewound su cassa ceramica** è realizzato avvolgendo un filo metallico attorno a un nucleo isolante, solitamente in ceramica, che dissipa meglio il calore. Questo tipo di resistore è noto per la sua elevata precisione e capacità di gestire potenze elevate. La ceramica agisce da isolante termico, rendendolo ideale per applicazioni in cui si richiedono alte potenze e temperature elevate.

#### IV. A.L.V.O. – Ambiente di Linguaggi e Voci Originari

Il concept del nuovo padiglione acustico, denominato **A.L.V.O. - Ambiente di Linguaggi e Voci Originari**, si basa su una combinazione di soluzioni architettoniche e acustiche innovative, ispirate ai modelli più all'avanguardia.

La scelta del nome mantiene il focus su un luogo di esplorazione sonora profonda e intima: "*Ambiente*" suggerisce un contesto immersivo e accogliente, mentre "*Linguaggi e Voci Originari*" evoca il concetto di suoni ed espressioni primordiali, quasi come una riscoperta delle radici acustiche. Questo concetto è racchiuso nell'acronimo **A.L.V.O.**, termine usato da Ludovico Ariosto nel poema Orlando Furioso col significato di grembo o ventre, e simboleggia uno spazio accogliente e originario. Nella visione ariostesca, l'alvo è un luogo di nutrimento e protezione, e così il padiglione intende essere un ambiente che avvolge il suono, come un grembo che custodisce le "voci" esistenziali e i nuovi "linguaggi" musicali.

**Alvo** mira a offrire allo spettatore un'esperienza immersiva e unica, rendendolo parte attiva delle fasi iniziali del percorso per stimolare un ascolto consapevole durante l'esecuzione.

Sono previsti quattro ambienti perimetrali, le *Stanze*, anticamere per la *Sala d'Esecuzione*.

La configurazione della Sala adotta un layout "a vigneto" ispirato all'*Elbphilharmonie* di Amburgo, con accenni al modello di anfiteatro greco. La forma esterna del padiglione si ispira alla MSG Sphere e al Padiglione Philips, con una struttura sferica asimmetrica pensata per creare un impatto visivo significativo, richiamando un'estetica futuristica, anche con l'uso di materiali avanguardistici come il vetro.

## Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| <i>fig. 1 Risposta in frequenza - tweeter</i> .....                                | 22 |
| <i>fig. 2 Risposta in frequenza - woofer</i> .....                                 | 22 |
| <i>fig. 3 Risposta in impedenza - tweeter</i> .....                                | 24 |
| <i>fig. 4 Impedenza - woofer con reflex</i> .....                                  | 24 |
| <i>fig. 5 Velocità dell'aria</i> .....   | 33 |
| <i>fig. 6 Risposta SPL cabinet Bass-Reflex</i> .....                               | 33 |
| <i>fig. 7 Dimensioni cabinet e Tubo reflex</i> .....                               | 34 |
| <i>fig. 8 Risposta in impedenza del cabinet</i> .....                              | 34 |
| <i>fig. 9 Parametri dimensionali del cabinet</i> .....                             | 35 |
| <i>fig. 10 Misure del pannello frontale</i> .....                                  | 35 |
| <i>fig. 11 Misure del pannello posteriore</i> .....                                | 35 |
| <i>fig. 12 Simulazione cabinet in 3D</i> .....                                     | 35 |
| <i>fig. 13 Dimensioni cabinet e Tubo reflex</i> .....                              | 36 |
| <i>fig. 14 Risposta in impedenza del cabinet</i> .....                             | 36 |
| <i>fig. 15 Cabinet simulato in Diffraction</i> .....                               | 37 |
| <i>fig. 16 Risposta di diffrazione del cabinet</i> .....                           | 37 |
| <i>fig. 17 Diffrazione con woofer in asse</i> .....                                | 37 |
| <i>fig. 18 Diffrazione con woofer a 20°</i> .....                                  | 37 |
| <i>fig. 19 Diffrazione con tweeter in asse</i> .....                               | 37 |
| <i>fig. 20 Diffrazione con tweeter a 20°</i> .....                                 | 37 |
| <i>fig. 21 Diffrazione con woofer in asse</i> .....                                | 38 |
| <i>fig. 22 Risposta in impedenza del tweeter</i> .....                             | 41 |
| <i>fig. 23 Risposta in impedenza del woofer</i> .....                              | 41 |
| <i>fig. 24 Filtro crossover</i> .....  | 42 |
| <i>fig. 25 Risposta in frequenza del crossover</i> .....                           | 42 |
| <i>fig. 26 Risposta SPL con crossover</i> .....                                    | 42 |
| <i>fig. 27 Risposta in impedenza del sistema</i> .....                             | 42 |
| <i>fig. 28 Misure del driver coassiale SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX</i> ..... | 44 |
| <i>fig. 29 Misure del pannello frontale</i> .....                                  | 44 |
| <i>fig. 30 Misure del pannello posteriore</i> .....                                | 45 |
| <i>fig. 31 Misure del pannello superiore</i> .....                                 | 46 |
| <i>fig. 32 Misure del pannello laterale</i> .....                                  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| <i>fig. 33 Audikom PCB01</i> .....             | 46 |
| <i>fig. 34 Jantzen Audio - PTD43L123</i> ..... | 48 |
| <i>fig. 35 Vaschetta in ABS VS01</i> .....     | 48 |

## **Indice delle tabelle**

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabella 1 SB Acoustics 5" SB13PFCR25-4-COAX</i> ..... | 21 |
| <i>Tabella 2 Componenti filtro crossover</i> .....       | 47 |

## Riferimenti

Dickason, V. (s.d.). *Loudspeaker Design Cookbook*.

Farina, A. (2001). *Elementi di Elettroacustica*. Parma: Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Martignon, G. (2010). *Fondamenti di Acustica*. Esculapio Editore.

Viappiani, P. (1984). *Bass Reflex - Teoria e pratica dei sistemi di altoparlanti* (Vol. Volume 1 - calcolo, progettazione e verifica aggiornati alle teorie più attuali). Roma: Gruppo Editoriale Suono.

Viappiani, P. (1985). *Cassa chiusa e reflex passivo - Teoria e pratica dei sistemi di altoparlanti* (Vol. Volume 2 - Calcolo, progettazione e verifica aggiornati alle teorie più attuali. Diffusori chiusi, sistemi aperti a dipolo, reflex passivi. Con appendice al volume "Bass-Reflex"). Roma: Gruppo Editoriale Suono.