

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Disseny, construcció i validació de caixes bass-reflex per a baixa freqüència”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Jordi Garcia Peris

Tutor/a:

Jesús Alba Fernández

Romina del Rey Tormos

GANDIA, 2016

Resum

Una de les tècniques per a la millora de la resposta en freqüència per a freqüències baixes en caixes d'altaveus, és la construcció d'un sistema bass-reflex. Aquest sistema, dissenyat de forma pertinent, millora la resposta de caixes tancades. En el present TFG es planteja la remodelació d'una caixa tancada, convertint-la en un sistema bass-reflex que siga més eficient, reajustat la resposta en freqüència per a freqüències baixes, elegint uns ports adequats i utilitzant diferents materials absorbents amb bona resposta. Obtenint així una caixa bass-reflex amb una resposta optimitzada, cosa que és motiu d'interés per a empreses del sector de la fabricació.

Abstract

A technique for improving the frequency response for low frequency speaker boxes is building a bass-reflex system. This system with a pertinent designed improves the response of closed boxes. This TFG raises the redevelopment of a closed box turning it into a bass-reflex system that's more efficient in low frequencies, readjusting the frequency response about choosing and using different ports and suitable absorbent materials with good response. In order to obtain a bass-reflex box with optimized response, which is a matter of interest to companies in the manufacturing sector.

Paraules clau

Electroacústica, bass-reflex, bafle, caixa acústica, millora de disseny

Keywords

Electroacoustic, bass-reflex, loudspeaker, acoustic box, design improvement

ÍNDIX

1. Introducció.....	3
1.1 Presentació	4
1.2 Objectius	4
1.3 Metodologia.....	4
1.4 Etapes.....	5
2. Marc teòric.....	6
2.1 Moviment harmònic simple.....	6
2.2 Tipus d'altaveus.....	8
2.3 Parts d'un altaveu dinàmic.....	9
2.4 Paràmetres característics d'un altaveu.....	11
2.5 Tipus de recintes acústics.....	13
2.5.1 Caixa tancada.....	14
2.5.2 Caixa bass-reflex.....	14
2.5.3 Caixa pas banda.....	15
3. Desenvolupament del treball.....	17
3.1.1 Caracterització de l'altaveu a l'aire lliure.....	17
3.1.2 Resistència elèctrica.....	17
3.1.3 Impedància màxima.....	17
3.1.4 Freqüència de ressonància.....	19
3.1.5 Coeficients de sobretensió mecànic, elèctric i total	19
3.1.6 Impedància mecànica.....	19
3.1.7 Volum d'aire equivalent.....	21
3.1.8 Factor BI.....	21
3.2 Volum de la caixa.....	22
3.3 Corba d'impedància de l'altaveu muntat a la caixa tancada.....	23
3.4 Resposta en freqüència i directivitat de la caixa tancada.....	24
3.5 Simulació del sistema bass-reflex.....	28
3.6 Remodelat de la caixa tancada.....	30
3.7 Resposta en freqüència i directivitat de les caixes bass-reflex.....	30
3.7.1 Sistema bass-reflex 8,2x6 cm.....	30
3.7.2 Sistema bass reflex 11,2x6 cm.....	33
3.8 Comparativa de les tres caixes.....	35
4. Conclusions.....	38
5. Bibliografia	40

1. Introducció

1.1 Presentació

Al llarg dels anys, s'han estudiat i caracteritzat les respostes que presenten els altaveus, mostrant un baix rendiment per a les freqüències més baixes. Aquest fenomen es veu accentuat quan els altaveus no estan instal·lats en caixes amb les mides i geometries adequades, de forma que el resultat obtés en comparació a les prestacions oferides pel propi transductor, dista molt del que es desitjaria. Açò presenta la necessitat de crear noves solucions per tal de millorar aquestes respostes.

L'origen del present treball es veu impulsat per la necessitat de dissenyar caixes que potencien aspectes acústics concrets, com puga ser una alta o baixa directivitat, una resposta plana per a determinat rang de freqüències, un reforç en guany de determinades freqüències o una bona extensió cap a baixes freqüències. Són aquests dos últims dissenys els que caracteritzen la resposta d'una caixa bass-reflex, la qual serà creada en aquest projecte.

1.2 Objectius

Aquest treball té com a objectiu principal la construcció de dues caixes bass-reflex. Per tal d'assolir aquest objectiu s'hauran d'acomplir objectius secundaris, com són la caracterització electromecànica de l'altaveu i el coneixement dels paràmetres bàsics de disseny necessaris per tal de construir una caixa bass-reflex.

A més, es presenten altres objectius secundaris que caldrà assolir, com són el coneixement dels procediments a seguir per a l'estudi de la resposta en freqüència de cada sistema, l'estudi de la directivitat de cada sistema i l'estudi de l'impacte introduït al utilitzar tant el sistema bass-reflex com diferents tipus d'absorbents acústics al revestiment de les caixes.

1.3 Metodologia

Per tal de dur a terme aquest projecte i poder aconseguir els seus objectius, s'ha seguit una metodologia quantitativa. Com es pot observar al llarg del projecte, es segueixen processos generalitzables per tal de mesurar, de forma controlada, una realitat estàtica, obtenint així les dades pertinents per tal de poder emetre juís de valor objectius que descriuen els resultats.

1.4 Etapes

El present treball consta de cinc etapes de treball. La primera es tracta de recopilar la informació necessària sobre l'estat de l'art per tal de conèixer la matèria i agilitzar els processos venidors. La segona començarà per caracteritzar l'altaveu a utilitzar al llarg del projecte i estudiar el comportament freqüencial i de directivitat que presenta al ser instal·lat en una determinada caixa i al utilitzar diferents materials absorbents per revestir-la interiorment. La tercera es basa en l'estudi de la possible millora de la caixa, mitjançant una ferramenta informàtica de simulació per tal d'oferir dos solucions, posteriorment es convertirà en un sistema bass-reflex que utilitzi unes mesures de port similars a les del mercat. A la quarta etapa es caracteritzarà el comportament freqüencial i directiu que presentaran les caixes bass-reflex per tal de quantificar les millores introduïdes. Per últim, la quinta i última etapa es tracta de la redacció de la memòria del projecte realitzat.

2. Marc teòric

2.1 Moviment harmònic simple

Per tal d'entendre com un altaveu origina un so introduint vibracions en un medi elàstic, primer cal saber que és un moviment harmònic simple.

Diem que una partícula o un cos oscil·la descrivint un moviment harmònic simple, d'ara endavant M.H.S., quan segueix una trajectòria periòdica rectilínia i està sotmès a l'acció d'una força restauradora que és proporcional a la posició i amb sentit cap al centre d'oscil·lació o punt d'equilibri.

A la figura 1 s'il·lustra un exemple d'aquest moviment que és el produït per un cos sotmès a una força elàstica del tipus $F = -kx$, on k és la constant elàstica del moll i x l'elongació. Considerant així el moviment del cos, que subjectat a la molla elàstica fixada per un extrem, llisca sense cap fregament sobre la superfície horitzontal, produint-se així un moviment periòdic o vibració del tipus M.H.S.

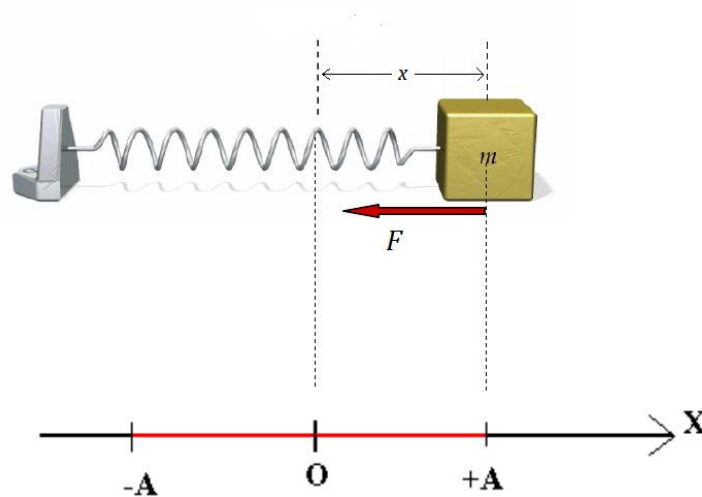


Figura 1. Moviment harmònic simple produït per un sistema massa-molla

Si es segueix l'exemple anterior, però en volta de forma horitzontal s'orienta el sistema de massa-molla de forma vertical, com es mostra a la figura 2 i s'introdueix un desplaçament horitzontal del sistema, per tal de representar el temps a l'eix de les x i l'elongació al l'eix de les y , es pot observar com aquest moviment oscil·latori s'ajusta al descrit per l'equació (1).

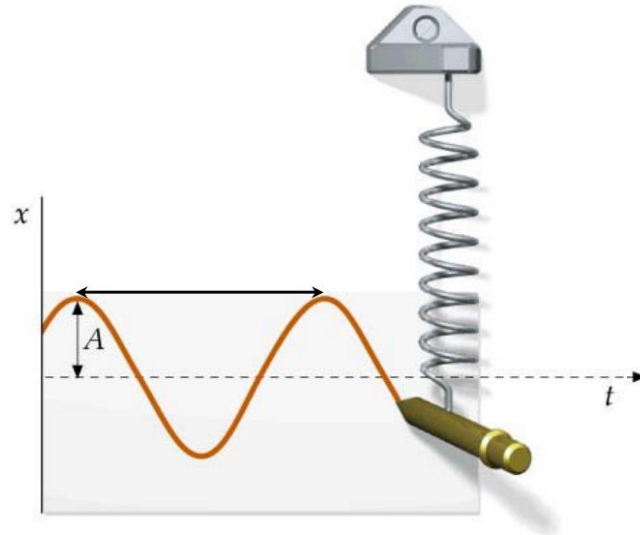


Figura 2: Moviment harmònic simple amb desplaçament temporal

Com s'ha dit, el moviment oscil·latori del sistema massa-molla es veu induït per la força $F = -kx$. Definint $\omega^2 = -\frac{k}{m}$ i m com la massa del cos, aplicant la segona llei de Newton, vegem com:

$$F = -k \cdot x = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} ; \quad \frac{d^2x}{dt^2} = a(t) = -\frac{k}{m} \cdot x ; \quad \frac{d^2x}{dt^2} = a(t) = -\omega^2 \cdot x$$

De forma que la solució per a aquesta equació diferencial és l'equació (1), que descriu el M.H.S. mostrat a la figura 2.

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Aquesta equació consta de tres constants: A l'amplitud màxima d'aquesta elongació; ω la freqüència angular, definida com $2\pi f$, on $f = \frac{1}{T}$ i T és el període definit en segons; i ϕ que representa la fase inicial. Amb açò es tenen dos variables, t que és el temps i que determinarà el valor de x , la posició respecte el centre de l'oscil·lació.

Cal especificar que les oscil·lacions poden ser lliures, on en el sistema una vegada en vibració no s'aturaria, ja que no actuaria cap força dissipativa sobre ell o esmortides, en les quals hi ha forces dissipatives, com per exemple el fregament, que acaben per aturar l'oscil·lació.

2.2 Tipus d'altaveus

Els altaveus són transductors electro-mecànic-acústic, ja que la seua funció és transformar l'energia elèctrica que entrega l'etapa de potència en un moviment mecànic, per tal de moure un diafragma, creant així les variacions de pressió, pel que independentment del principi de funcionament de cada altaveu, tots necessiten d'un medi físic al qual transmetre les vibracions ocasionades.

Aquestes vibracions podran ser interpretades com a un so, si estan dins del rang de freqüències audibles de l'ésser viu i s'interpreten pel seu sistema auditiu, com és el cas dels ésser humans quan reben vibracions compreses entre els 20 Hz i els 20 kHz al conjunt del sistema auditiu situat al crani o dels gossos que poden escoltar freqüències fins als 40kHz. Pel contrari, quan aquestes vibracions no estan al rang de freqüències adequat i/o no nos rebudes pel sistema auditiu, simplement no s'escolten o s'interpreten com vibracions mitjançant el tacte.

La principal manera d'agrupar els diferents tipus altaveus és la forma en que transformen l'energia elèctrica en acústica, encara que hi haja subgrups que varien en el seu disseny, podem diferenciar 4 grups principals, que són:

- De plasma: aquest tipus d'altaveus ionitza l'aire que hi ha entre els dos conductors, que actuen de bornes, mitjançant corrents elèctriques d'alta tensió. Amb aquesta ionització es produeix la transferència d'electrons, de forma que augmenta la temperatura de l'aire que hi ha al voltant del plasma, creant així les diferències de pressió que originen el so.
- Electrostàtic: de forma similar al funcionament dels condensadors, es situen dues plaques, una fixa i l'altra mòbil que actuarà com a diafragma, a les quals se lis aplica una diferència de tensió proporcional al desplaçament, de forma que per tal de suportar-ho la placa mòbil es mou, creant així les diferències de pressió en l'aire.
- Piezoelèctric: aquest tipus de transductors utilitza l'efecte piezoelèctric de determinats cristalls o ceràmiques. Mitjançant fines làmines o discs, s'aplica una diferència de potencia entre les dues cares, de forma que el material vibrar estirant-se o contraient-se, produint així les variacions de pressió.
- Dinàmic: aquest és el tipus d'altaveus més estés al mercat i el que s'utilitza al present projecte. La membrana està unida a una bobina, per la qual viatja una corrent que crea diferents camps magnètic de forma que la bobina es mou de forma transversal pel centre de l'imant fixe, movent així el diafragma i creant les diferències de pressió.

2.3 Parts d'un altaveu dinàmic

Per tal de poder identificar les parts d'un altaveu dinàmic i el paper que juguen en la transducció electro-mecànic-acústica, a la figura 3 es mostra el dibuix de la secció transversal, mentre que a la figura 4 podem observar un exemple real.

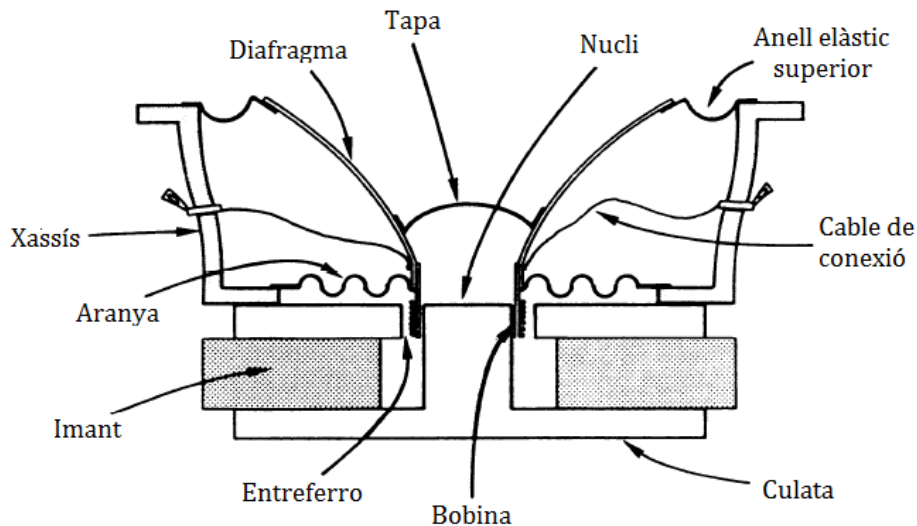


Figura 3: Esquema part transversal d'un altaveu dinàmic

Com s'observa a l'anterior figura, un altaveu dinàmic consta d'onze parts principals, que són:

- Diafragma: pot estar construït amb diferents materials com: materials fibrosos i lleugers derivats de la cel·lulosa, polipropilè, kevlar, fibra de carbó o fins i tot d'alumini. S'encarrega de transmetre l'oscil·lació de la bobina, movent l'aire que es troba al voltant d'ella, creant així les ones acústiques. La seua forma i grandària dependrà del rang de freqüències per al qual estiga dissenyat.
- Tapa: evita que s'embrute l'entreferro.
- Nucli: està situat al centre del imant i alberga al seu voltant la bobina mòbil.
- Anell elàstic: és la goma que uneix el diafragma al xassís, proporcionant una unió flexible però ferma i duradora.
- Cables de connexió: serveixen per connectar els extrems de la bobina amb els borns, punt on introduïm el senyal elèctric.
- Imant: pot ser de ferrita, samari-cobalt, aliatge d'acer o de neodimi. Aquest imant circular proporciona un potent camp magnètic fixe amb el que interactuarà la bobina.

- Entreferro: és l'espai que hi ha entre l'imant i el nucli per el qual es mou la bobina.
- Bobina: es tracta d'un debanat de fil de coure que està muntat sobre un cilindre, encarregat de suportar els esforços i comunicar-li el moviment al con del diafragma. Es mou per l'entreferro degut a la interacció del camp magnètic de l'imant i el camp magnètic creat per la corrent que corre a través d'ella.
- Aranya: s'encarrega de mantenir centrat el cilindre on està muntada la bobina, proporciona una unió forta entre el diafragma, el cilindre i l'aranya. A més, limita el desplaçament de la bobina per tal de que no se'n isca de l'entreferro.
- Xassís: és l'esquelet de l'altaveu, suporta totes les peces i mitjançant aquest es pot muntar l'altaveu sobre diferents superfícies.
- Culata: part posterior de l'altaveu que alberga al seu interior l'imant.

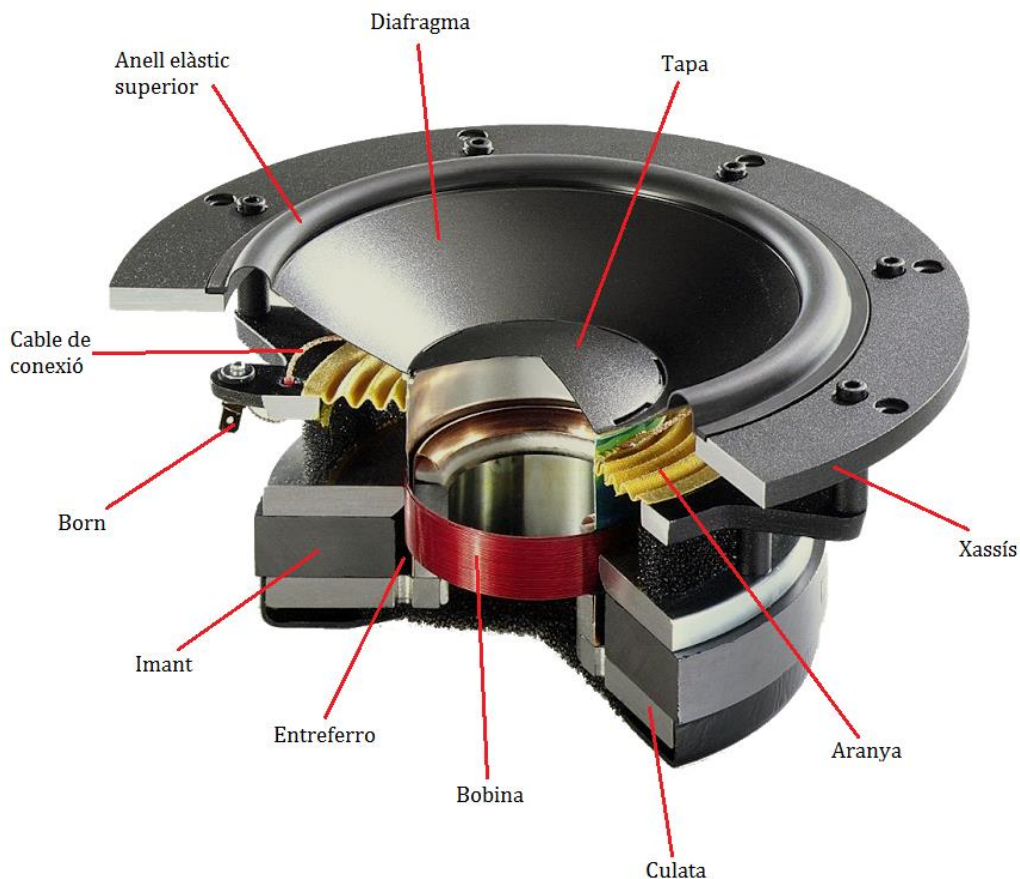


Figura 4: Exemple real part transversal d'un altaveu dinàmic. Marca C-Quenze

2.4 Paràmetres característics d'un altaveu

Encara que tots els altaveus dinàmics operen baix el mateix principi de funcionament, les diferències en el disseny i els materials utilitzats per a la seua construcció faran que es comporten de forma diferent davant d'una mateixa excitació elèctrica.

Com és de suposar, aquests paràmetres variaran de forma notable per a models diferents o per a altaveus destinats a diferents rangs de freqüències, però inclús en un mateix model i sèrie, es troben menudes variacions, que es poden observar repetint l'assaig en altaveus diferents o, simplement, comparant els valors obtinguts de forma empírica amb els proporcionats pel catàleg del fabricant.

És per açò pel que cal realitzar proves independents a cada altaveu per tal d'obtindre els paràmetres que s'explicaran a continuació, per tal de conèixer de forma més detallada quin serà el seu comportament baix una excitació elèctrica, donant-nos així facilitats a l'hora de dissenyar un recinte acústic concret.

Si s'entén un altaveu com un transductor electro-mecànic-acústic que s'integra a un circuit elèctric, format per un generador, un amplificador de potència i el propi altaveu, aquest tindrà una impedància elèctrica total, Z_{ET} , igual a la descrita en la següent igualtat:

$$Z_{ET} = Z_E + Z_{MOV} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_{MS} + Z_{MR}} \quad (2)$$

Aquesta impedància elèctrica total la podem dividir en dos termes, la impedància elèctrica pura, representada per Z_E , i la impedància introduïda derivada del moviment i els elements mecànics, Z_{MOV} . De forma que:

$$Z_E = R_E + j\omega L_E \quad Z_{MOV} = \frac{(Bl)^2}{Z_{MS} + Z_{MR}} \quad (3) (4)$$

A la impedància elèctrica intervenen:

R_E : representa la resistència elèctrica que presenta el conjunt de l'altaveu i la seua unitat és l'Ohm.

L_E : l'autoinductància de la bobina, que junt a la freqüència de treball ω , formen la part complexa. La seua unitat són els Henrios.

Per altra banda, la impedància elèctrica de moviment Z_{MOV} queda representada per:

Bl : producte entre el flux magnètic de l'entreferro (B) i la longitud de la bobina (l), que es mesuren en weber/m² i m², respectivament.

Z_{MR} : representa la impedància mecànica introduïda per la radiació i la seua unitat és l'Ohm. En el present projecte, aquesta impedància s'ha depreciat, ja que la impedància de radiació introduïda, per l'entrega de potència al medi en forma d'ona a baixa

freqüència, és molt menor que les pèrdues introduïdes de la resistència mecànica de la suspensió y la resistència de la bobina.

Z_{MS} : la impedància mecànica de la suspensió ens dona informació sobre els elements mecànics del sistema i la seua unitat és l'Ohm. Per tal de poder calcular la impedància mecànica s'utilitza la següent igualtat:

$$Z_{MS} = R_{MS} + j \left(\omega \cdot M_{MS} - \frac{1}{\omega \cdot C_{MS}} \right) \quad (5)$$

En aquesta impedància mecànica intervenen:

R_{MS} : la resistència mecànica que ofereix la suspensió es mesura en kg/s i que queda definida per:

$$R_{MS} = \frac{\omega_0 \cdot M_{MS}}{Q_{ms}} \quad (6)$$

M_{MS} : la massa mecànica que es mou a l'excitar l'altaveu es mesura en quilograms. Es calcula utilitzant una massa m coneguda per tal d'obtindre una nova freqüència de ressonància, f'_0 , i la següent igualtat:

$$M_{MS} = \frac{m}{\left(\frac{f_0}{f'_0}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

C_{MS} : la compliància mecànica de la suspensió es mesura en m/N i caracteritza la resistència que oposarà el sistema a ser deformat sense trencar-se, és a dir, com d'elàstic és.

$$C_{MS} = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot M_{MS}} \quad (8)$$

Per tal de poder caracteritzar de forma més completa un altaveu, als paràmetres nombrats fins ara, cal sumar-li els paràmetres que fan referència a les ressonàncies, també coneguts com paràmetres de Thiele-Small, que reben el nom en honor als precursors *A. Neville Thiele* i *Richard H. Small*. Aquests paràmetres són:

f_0 : freqüència de ressonància de l'altaveu a l'aire lliure, què determinarà el rang de freqüències que serà capaç de reproduir, el qual sempre estarà per d'amunt d'aquesta. La seua unitat són els Hz.

Z_{max} : el valor màxim de la impedància, que es donarà a la freqüència de ressonància. Aquest es mesura en Ohm.

$Z_{f_1f_2}$: valor de la impedància on es trobaran les freqüències f_1 i f_2 , de tal forma que $f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2}$. Aquest valor el calculem mitjançant $Z_{f_1f_2} = \sqrt{Z_{max} \cdot R_E}$.

Q_{ms} : el factor de sobretensió mecànic ens indica el nivell de pèrdues que introduiran els elements mecànics, com l'aranya o l'anell de suspensió, i queda definit per la següent igualtat, on $r_0 = \frac{Z_{max}}{R_E}$:

$$Q_{ms} = \frac{f_0 \cdot \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1} \quad (9)$$

Q_{es} : el factor de sobretensió elèctric ens indica el nivell de pèrdues que hi haurà el sistema per motius electromagnètics, com és la bobina o la interacció del camp de la bobina amb l'imant, i es calcula com:

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} \quad (10)$$

Q_t : el factor de sobretensió total ens relaciona el factor de sobretensió mecànic i elèctric, per tal de donar una visió de les pèrdues totals. Tant al factor de sobretensió mecànic com elèctric, quant major siga el valor menys pèrdues tindrà el sistema, per contra, a menor valor més pèrdues seran introduïdes. Sempre es confirma que $\frac{1}{Q_{ts}} = \frac{1}{Q_{es}} + \frac{1}{Q_{ms}}$ i es calcula com:

$$Q_t = \frac{Q_{ms}}{r_0} \quad (11)$$

V_{AS} : aquest paràmetre determina el volum d'aire equivalent que té la mateixa elasticitat que el sistema suspensori del nostre altaveu, es mesura en litres i es pot calcular mitjançant la igualtat següent, on ρ_0 és la densitat de l'aire, c la velocitat del so i S_d la superfície efectiva del diafragma.

$$V_{AS} = C_{MS} \cdot \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_d^2 \quad (12)$$

2.5 Tipus de recintes acústics

Entenem per recinte acústic com una caixa o bafle que ha sigut dissenyat de forma específica per tal d'albergar al seu interior un sistema d'altaveus. Aquesta necessitat naix per dues raons, la més obvia és que es necessita d'un lloc on muntar de forma fixa el altaveu i la segona, que no menys important, és per tal d'evitar el *curtcircuit acústic*.

L'anomenat *curtcircuit acústic* es produeix degut a que la membrana de l'altaveu està formada per dues cares, l'interior i l'exterior, de forma que quan s'excita per tal de reproduir un so, aquesta vibra creant dues ones iguals però amb fase inversa. Aquest fenomen dona lloc a pertorbacions i possibles cancel·lacions en el so no desitjades, que s'accentuen a les freqüències més baixes, degut a les grans mides de longitud d'ona i a que a baixes freqüències l'altaveu es comporta com una font omnidireccional.

Per tal d'evitar aquest fenomen caldria separar la part anterior i posterior de la membrana amb una pantalla infinita, de forma que les ones causades per la part interior i exterior de la membrana no es trobaren. Com aquesta solució és inviable, s'opta per una pantalla de mida més reduïda que té un bon funcionament per a freqüències altes, les quals tenen una longitud d'ona més menuda i s'emeten de forma més direccional. Però continua presentant problemes per a longituds d'ona similars i superiors a les mides d'aquesta pantalla. Amb açò naixen les caixes i el disseny de recintes acústics específics per a cada sistema d'altaveus.

Cal destacar que al introduir l'altaveu en una caixa és veuran modificats paràmetres com la corba d'impedància respecte freqüència, ja que aquest passarà a moure's de l'aire lliure a un recinte tancat, el qual conté una certa quantitat d'aire que presenta una determinada elasticitat. A més de paràmetres com la directivitat o la resposta en freqüència.

Encara que el disseny de recintes acústics és extens, s'explicaran de forma breu els tres tipus més utilitzats, que són: recinte tancat, recinte bass-reflex i recinte pas banda.

2.5.1 Caixa tancada

Aquest és el tipus de caixa més simple i està al mercat. L'altaveu s'introdueix al recinte, com es mostra a la figura 5, de forma que la part exterior de la membrana radia cap al exterior de forma directa i la radiació produïda per la part interior de la membrana, que està en contrafase, queda esmortida per l'interior del recinte, evitant així el curtcircuit acústic.

Per tal d'aconseguir un bon resultat, la caixa ha de tindre un bon segellat, evitant així pèrdues. A més, el revestiment en forma de material absorbent, que es representa de color gris a la figura 5, ha de ser de qualitat per tal d'esmortir les vibracions a l'interior, evitant així ressonàncies no desitjades.

Cal tindre en compte que la f_b , freqüència de ressonància de l'altaveu dins la caixa, serà major a f_0 , freqüència de ressonància de l'altaveu a l'aire lliure. Així i tot, aquest model presenta grans avantatges com: la simplicitat, la resposta temporal o la resposta en freqüència front a tamanys moderats de recinte.

2.5.2 Caixa bass-reflex

Les caixes de tipus bass-reflex estan dissenyades per tal d'aprofitar part de l'energia que entrega la cara interior de la membrana i que es queda dins del recinte acústic, aportant un increment en la eficiència a baixes freqüències.

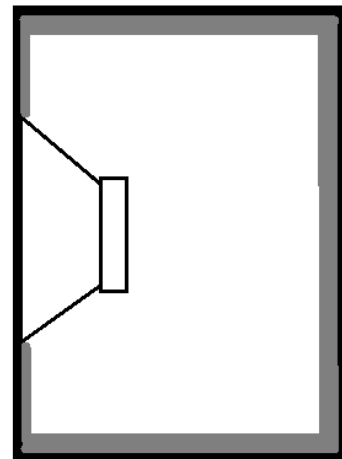


Figura 5: Representació caixa tancada

Per tal d'aconseguir aquest efecte, la caixa compta amb un orifici i un tub de determinades dimensions, anomenat port, com podem observar en la figura 6. Degut a que les longituds d'ona per a les baixes freqüències tenen valors de l'ordre de 10 metres, són considerablement més grans que les dimensions del port, pel que la massa d'aire d'aquesta obertura entrarà en ressonància quan s'excite la massa d'aire que hi ha dins del recinte, que actuarà com un moll, pel que el conjunt es comportarà com un ressonador de Helmholtz.

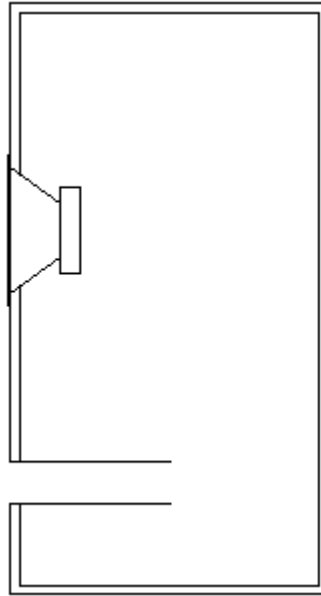


Figura 6: Caixa bass-reflex

Quan la f_p , freqüència de ressonància del port, es elegida menor a la f_b , freqüència de ressonància de l'altaveu dins del recinte, l'ona emesa en contrafase per la part interior del diafragma excita l'aire que resideix al tub i fa que ressoni, invertint la fase per a tot el rang de freqüències comprés entre f_p i f_b . D'aquesta manera, el port es comporta com un emissor passiu, que emet a baixes freqüències amb un retràs d'un període. D'aquesta manera es proporciona una millora del nivell de pressió emès d'uns +3 dB al voltant de la freqüència de sintonia del port.

2.5.3 Caixa pas banda

En aquestes caixes, l'altaveu està ubicat a una paret interior que separa el recinte en dos, com es mostra a la figura 7 i 8. Les dues configuracions més habituals són: deixar una cavitat com a caixa segellada i l'altra com a semi-caixa bass-reflex, es a dir, que sols consta del tub ressonador per comunicar-se amb l'exterior, com es mostra a la figura 7, o crear dos semi-caixes bass-reflex, com es mostra a la figura 8.

Aquestes caixes actuen com a filtres acústics pas banda, ja que l'aire contés a cada semi caixa actua com una massa mòbil, fent que cada tub entre en ressonància, emetent així sols un rang de mitges-baixes freqüències determinat.

Per tal d'aconseguir aquest efecte, les caixes han d'estar molt ben construïdes i revestides interiorment amb un bon absorbent acústic per tal de suportar les elevades pressions dels recintes interiors i poder tindre una bona extensió cap a les baixes freqüències. Així i tot, aquest tipus de recintes no presenten una bona resposta temporal ni bona eficiència.

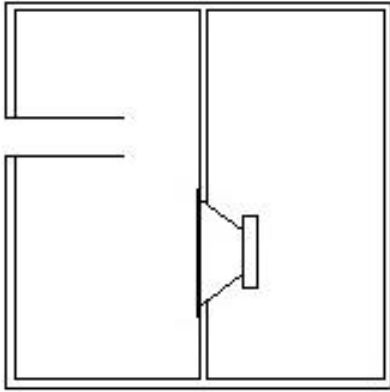


Figura 7: Caixa pas banda de 4t ordre

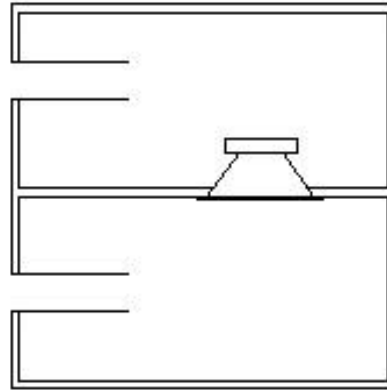


Figura 8: Caixa pas banda de 6t ordre

3. Desenvolupament del treball

3.1 Caracterització de l'altaveu

Per al present projecte s'utilitza l'altaveu 8BR40/N del fabricant Beyma, destinat a mitges-baixes freqüències. Per tal de conèixer de forma més precisa els paràmetres esmentats a l'apartat 2.4, es mesuren de forma empírica els anomenats paràmetres de Thiele-Small, que proporcionaran la informació necessària per tal de calcular els paràmetres que defineixen les impedàncies.

3.1.1 Resistència elèctrica

En primer lloc, utilitzant un multímetre digital, s'ha mesurat la resistència elèctrica que presenta l'altaveu front al pas d'una corrent contínua. Configurant el multímetre amb l'escala més baixa de mesura d'Ohms i connectant cada elèctrode a un born, s'ha obtingut un valor de $R_E = 5,9 \Omega$.

Si es compara aquest resultat amb el que ofereix el catàleg del fabricant, $R_{E,Catàleg} = 6,5 \Omega$, vegem com està dins del marge però amb $0,6 \Omega$ de diferència.

3.1.2 Impedància màxima

A continuació, per tal de produir la gràfica d'impedància front a freqüència, s'ha utilitzat el programa informàtic *CLIO v.10* i l'amplificador *QCBOX fw*, que es facilita amb el propi programa.

Per tal d'obtindre les mesures s'ha connectat un canal d'eixida de l'amplificador QCBOX als borns mitjançant connectors jack i cocodril, respectivament. Per tal de recollir les variacions de tensió produïdes als borns en funció de la freqüència, s'han connectat els borns a una entrada de l'amplificador QCBOX de igual forma que a l'eixida, obtenint el resultat de la figura 9.

Fixant-se en la zona al voltat dels 30 Hz, figura 10, i mitjançant el fitxer de text on s'ha exportat el valor de cada punt utilitzat per a la construcció de la gràfica, es veu com $Z_{max} = 29,44 \Omega$.

Z (Ohm)

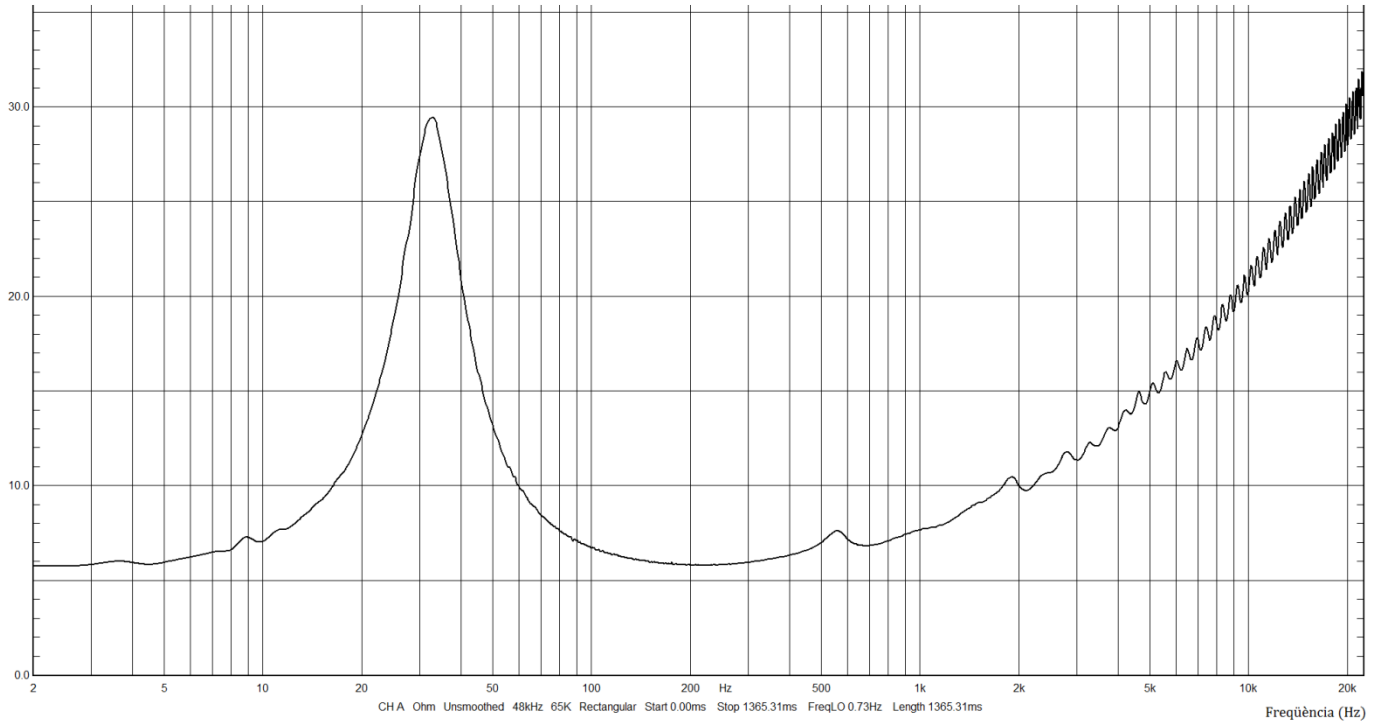


Figura 9: Corba de impedància de l'altaveu a l'aire lliure front a freqüència

Impedància (Ohm)

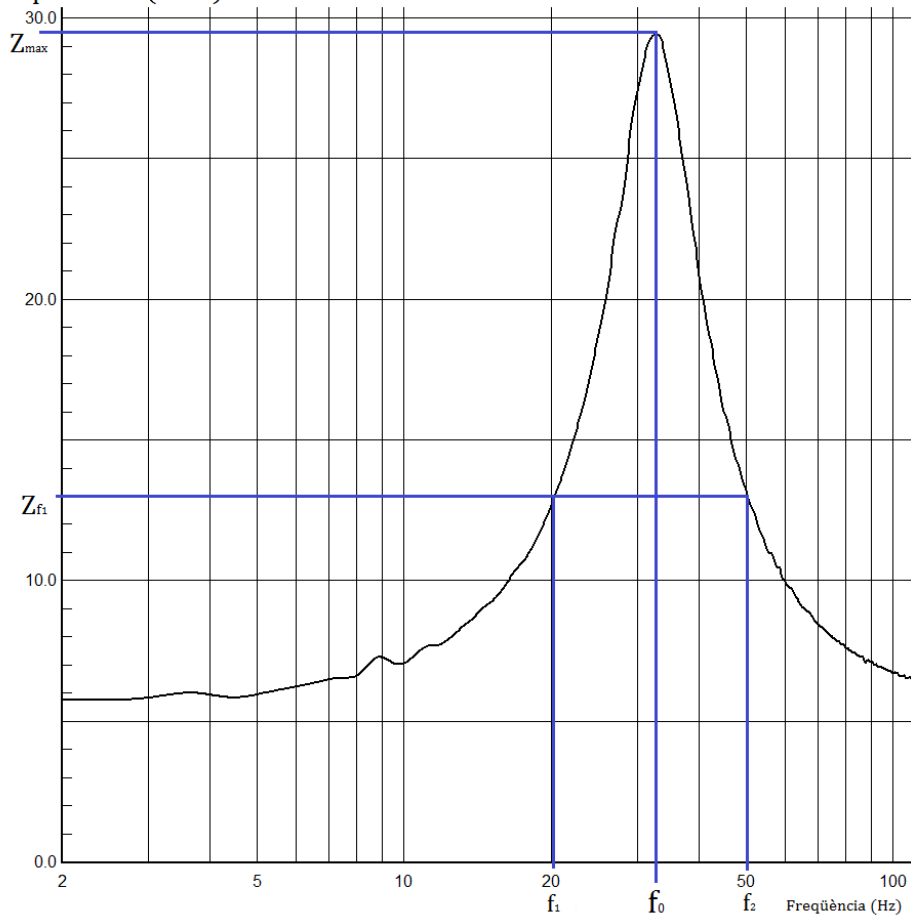


Figura 10: : Regió d'interès de la corba de impedància de l'altaveu a l'aire lliure front a freqüència

3.1.3 Freqüència de ressonància

Amb aquests dos valors, R_E i Z_{max} , es calcula el valor de $Z_{f_1 f_2}$ i de r_0 .

$$Z_{f_1 f_2} = \sqrt{Z_{max} \cdot R_E} = \sqrt{29,44 \cdot 5,9} = 13,18 \Omega$$

$$r_0 = \frac{Z_{max}}{R_E} = \frac{29,44}{5,9} = 4,99$$

Buscant aquest valor al fitxer de text exportat pel programa, s'obtenen les freqüències f_1 i f_2 , de forma que la freqüència de ressonància del sistema coincideix amb el punt de major impedància.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{20,47 \cdot 50,06} = 32,01 \text{ Hz}$$

Cal destacar que s'ha preferit utilitzar el valor de $f_0 = 32,71 \text{ Hz}$, ja que coincideix amb el màxim de impedància i sols dista 0,7 Hz del valor obtingut geomètricament, distant 0,5 Hz del valor proporcionat al catàleg.

Amb açò, es pot comprovar com l'altaveu, a falta de la resposta colorejada que introduirà la caixa, serà capaç de reproduir de forma fidel, senyals d'àudio amb components freqüencials mitges i baixes, però mai inferior a la freqüència de ressonància.

3.1.4 Coeficients de sobretensió mecànic, elèctric i total

Coneguts aquests valors, ja es poden calcular els factors de sobretensió mecànic, elèctric i total.

$$Q_{ms} = \frac{f_0 \cdot \sqrt{r_0}}{f_2 - f_1} = \frac{32,71 \cdot \sqrt{4,99}}{50,06 - 20,47} = 2,469$$

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} = \frac{2,469}{4,99 - 1} = 0,618$$

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms}}{r_0} = \frac{2,469}{4,99} = 0,495$$

Comparant aquests valors amb els oferits pel fabricant es veu com són molt pròxims, però, als tres casos, amb valors inferior, els quals en indica que tindrà un rendiment, en xicoteta mesura, menor al que es podria esperar.

3.1.5 Impedància mecànica

Aplegats a aquest punt, es calculen els valors de la massa, compliància i resistència mecànica, que determinen el valor de la impedància mecànica de la suspensió.

Per tal de poder realitzar aquests càlculs, utilitzant la igualtat (7), esmentada a l'apartat 2.4, es procedeix a tornar a mesurar la corba d'impedància seguint el procediment descrit amb anterioritat, però aquesta vegada situant un pes de massa coneguda adherit a la tapa de l'altaveu per tal d'obtindre una nova freqüència de ressonància, la qual serà menor degut al augment de la massa mecànica del sistema.

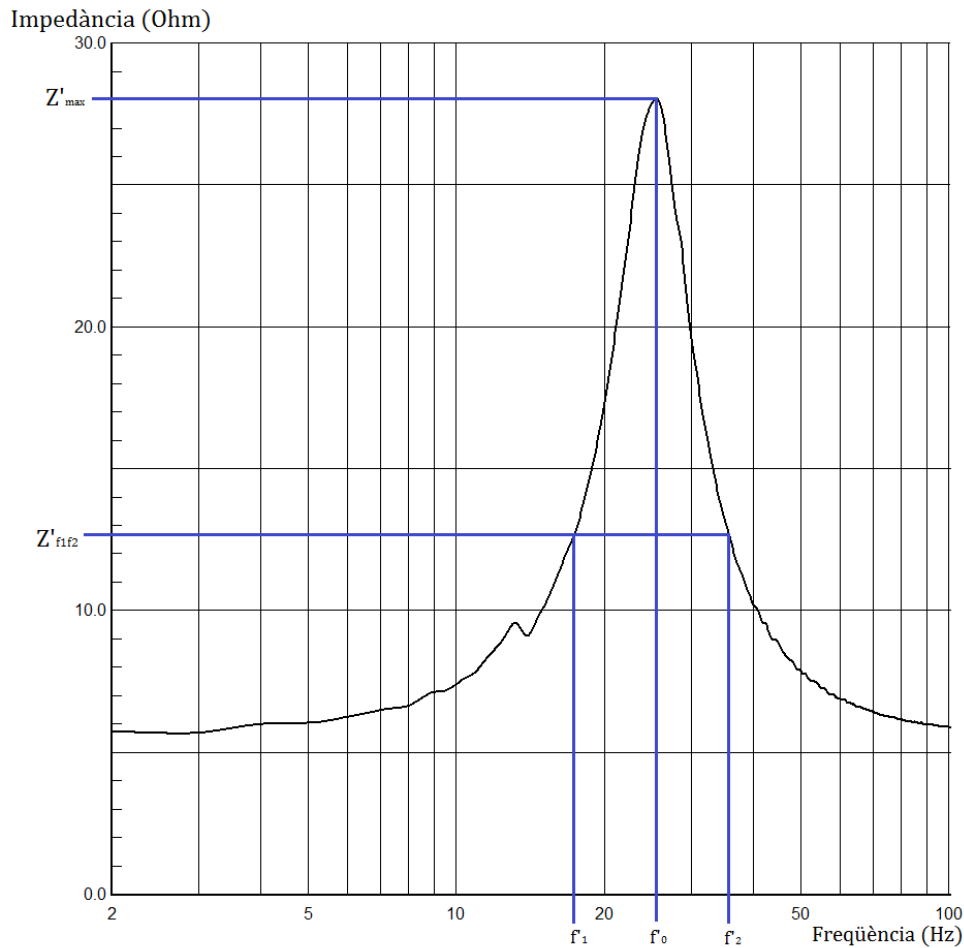


Figura 11: Corba de impedància de l'altaveu a l'aire lliure amb massa situada al diafragma front a freqüència

Utilitzant una massa de $m = 0,01595$ Kg, s'ha obtés la nova corba d'impedància, la qual adopta un valor màxim de $Z'_{max} = 28,06$, situat a la freqüència $f'_0 = 25,53$ Hz, com es pot observar a la figura 11. Utilitzant aquest resultat realitzem els següents càlculs:

$$M_{MS} = \frac{m}{\left(\frac{f_0}{f'_0}\right)^2 - 1} = \frac{0,01595}{\left(\frac{32,71}{25,53}\right)^2 - 1} = 0,02486 \text{ Kg}$$

$$C_{MS} = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot M_{MS}} = \frac{1}{(2\pi \cdot 32,71)^2 \cdot 0,02486} = 0,0009523 \text{ m/N}$$

$$R_{MS} = \frac{\omega_0 \cdot M_{MS}}{Q_{ms}} = \frac{2\pi \cdot 32,71 \cdot 0,02486}{2,4693} = 2,06913 \text{ Kg/s}$$

Si es comparen aquests valors amb els facilitats pel fabricant vegem com la diferència és mínima, pel que el pot afirmar que els valors per als paràmetres utilitzats fins ara són vàlids.

3.1.6 Volum d'aire equivalent

Per al càlcul d'aquest paràmetres utilitzarem una densitat de l'aire, $\rho_0 = 1.23 \text{ Kg/m}^3$, la velocitat de propagació del so, $c = 343 \text{ m/s}$ i una superfície efectiva de radiació del diafragma, $S_d = 0,022 \text{ m}^2$, obtenint el següent resultat:

$$V_{AS} = C_{MS} \cdot \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_d^2 = 0,0009523 \cdot 1,23 \cdot 343^2 \cdot 0,022^2 = 0,0667 \text{ m}^3 = 66,7 \text{ l}$$

Comparant aquest valor amb el del catàleg, s'observa que varia en cinc litres, pel que es pot acceptar i considerar vàlid, atenent a la utilització de diferents valors de densitat de l'aire i velocitat de propagació del so, a més de la menuda desviació en la compliància mecànica de la suspensió.

3.1.7 Factor Bl

Per últim, es calcularà el factor Bl, originat pel producte entre el flux magnètic que hi ha a l'entreferro i la longitud de la bobina.

$$Q_{es} = \frac{\omega_0 \cdot M_{MS}}{R_E} ; \frac{(Bl)^2}{R_E} = \frac{\omega_0 \cdot M_{MS}}{Q_{es}} ; (Bl)^2 = \frac{\omega_0 \cdot M_{MS} \cdot R_E}{Q_{es}} ;$$

$$; Bl = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 32,71 \cdot 0,02486 \cdot 5,9}{0,618}} = 6,979 \text{ N/A}$$

Del que podem deduir que el flux magnètic que hi ha a l'entreferro és de:

$$B = \frac{6,979}{l} = \frac{6,979}{0,016} = 436,19 \text{ Wb}$$

Es pot observar com el valor obtés per al factor Bl és quasi idèntic al proporcionat pel fabricant, pel que podem concloure que les desviacions introduïdes fins al moment en els anteriors càlculs són acceptables, atorgant-li validesa als resultat.

Arribats a aquest punt, els paràmetres necessaris per tal d'escriure l'equació de la impedància elèctrica que represa el nostre altaveu, esmentada a l'equació (2) de l'apartat 2.4 (depreciant la part de la impedància mecànica de radiació pels motius

esmentats), ja estan mesurats i calculats, pel que es pot reescriure de la següent forma:

$$Z_{ET} = 5,9 + j\omega \cdot 0,0008 + \frac{6,979^2}{2,06913 + j(\omega \cdot 0,02486 - \frac{1}{\omega \cdot 0,0009523})}$$

3.2 Volum de la caixa

Per tal de saber quina serà la forma de la corba de resposta en freqüència per a l'extrem de baixes freqüències, cal fer una aproximació al valor del volum de la caixa, V_B . Obtenint un factor de sobretensió, Q_{tc} , del sistema altaveu-caixa, el qual modelarà aquesta corba.

Càlcul del volum de la caixa, factor de sobretensió i freqüència de tall a -3 dB, respectivament:

$$V_B = 20 \cdot V_{AS} \cdot Q_{ts}^{3,3} = 20 \cdot 0,0667 \cdot 0,495^{3,3} = 0,131 \text{ m}^3 = 131 \text{ l}$$

$$Q_{tc} = \frac{V_B}{V_{AS}} = \frac{0,131}{0,0667} = 9,3$$

$$f_{-3} = \sqrt{\frac{V_{AS} \cdot f_0^2}{V_B}} = \sqrt{\frac{0,0667 \cdot 32,71^2}{0,131}} = 23,34 \text{ Hz}$$

Fixant-se en les corbes normalitzades de la figura 12, que representen la resposta en freqüència per a baixes freqüències en un sistema bass-reflex, es pot comprovar quina serà la resposta del sistema per a un volum de la caixa de 131 l, el qual aportarà un $Q_{tc}=9,3$ de forma que s'introduirà una millora inferior als 1,5 dB.

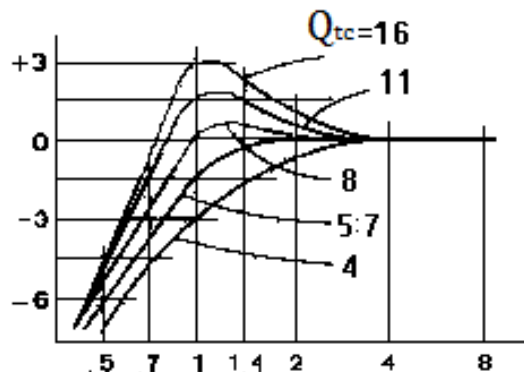


Figura 12: Corbes normalitzades per a la sobretensió de la caixa bass-reflex

Cal destacar que es tracta d'una aproximació, la qual es compararà a la l'apartat 3.5 amb els valors facilitat pel programa de simulació WinISD. A més, com els resultats obtinguts prediuen un volum de la caixa de 131 l, aquesta caldria que tingués unes mides considerables, que no tindrien sentit amb les solucions que utilitzen aquest altaveu a l'àmbit comercial. És per açò pel que es decideix utilitzar una caixa més menuda, ja construïda i proporcionada pel departament d'acústica de l'EPSG, la qual te unes mesures interiors de 0,31 x 0,615 x 0,153 metres, presentant un volum de 29,17 l.

3.3 Corba d'impedància de l'altaveu muntat a la caixa tancada

Cal tindre en compte la influència que tindrà l'elasticitat que presenta l'aire que es troba dins del bafle utilitzat sobre el comportament de l'altaveu. És per això que cal repetir la mesura de la corba d'impedància respecte la freqüència amb l'altaveu instal·lat a la caixa. D'aquesta forma i seguint el procediment esmentat en anterioritat, la nova corba d'impedància respecte freqüència que presentarà l'altaveu al bafle es mostra a la figura 13.

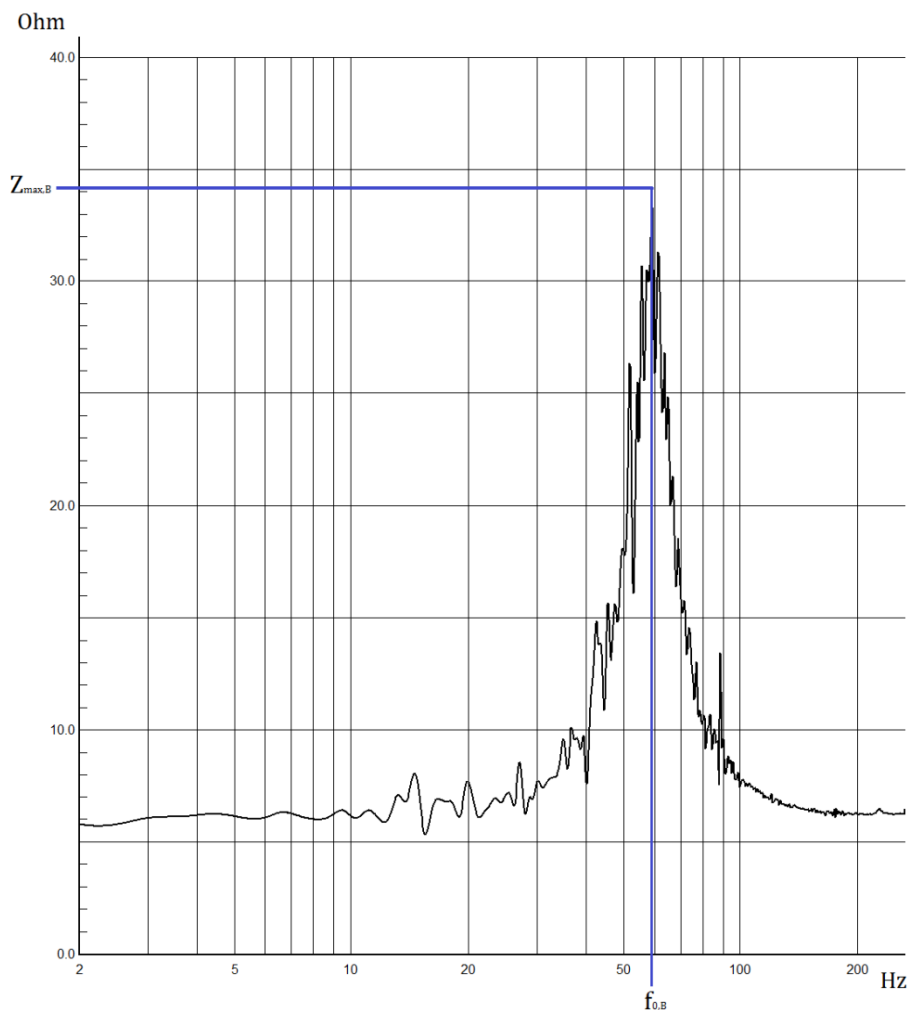


Figura 13: Corba d'impedància front a freqüència de l'altaveu muntat a la caixa tancada

La caixa utilitzada per a fer les mesures i que posteriorment serà convertida en un recinte bass-reflex, presenta unes mides interiors de 31 centímetres d'ample, 61,5 centímetres d'alçada i 15,3 centímetres de profunditat, aportant un volum de **$V_b=29,17$ l**. Aquesta caixa està construïda amb taulers de fibra de densitat mitjana, els quals presenten un grossor de 20 mil·límetres i una densitat aproximada de 700 Kg/m^3 . Aquests taulers es construeixen aglutinant fibres de fusta mitjançant resina i altes pressions.

Com es pot observar en la figura 13, la utilització del recinte a introduït canvis en el comportament de l'altaveu, movent la corba d'impedància cap a les altes freqüències, que ara presenta un màxim d'impedància de **$Z_{max,B} = 34,21 \Omega$** a la nova freqüència de ressonància del sistema **$f_{0,B} = 59,10 \text{ Hz}$** . És de destacar que mentre que el màxim d'impedància sols ha augmentat en 5Ω , la freqüència de ressonància ha augmentat en $26,39 \text{ Hz}$.

Aquest fenomen retalla de forma considerable l'extensió cap a les baixes freqüències, fent més necessari una millora en baixos, pel que es considera que la millor solució és convertir aquesta caixa en un recinte bass-reflex, el qual serà revestit interiorment amb material absorbent per tal d'augmentar el volum i millorar la resposta freqüencial.

3.4 Resposta en freqüència i directivitat de la caixa tancada

Per tal d'analitzar i comparar les diferents respostes en freqüència i directivitats que presentarà el bafle, depenent de la configuració de la caixa i dels absorbents utilitzats, s'ha estudiat el seu comportament a la càmera anecoica mitjançant una excitació amb soroll rosa. Aquestes mesures han requerit del següent material i configuració:

- Càmera anecoica de l'EPSC: recinte lliure de soroll de fons i reverberacions que és necessari per tal de mesurar la resposta de l'altaveu front a una excitació elèctrica determinada, de forma que no es falsegen els resultats pel soroll introduït per fonts externes o reverberacions provinents de l'espai que envolta l'altaveu.
- Sonòmetre Brüel&Kjaer 2250: per tal d'enregistrar les mesures, el sonòmetre s'ha situat a dos metres de distància i a la mateixa altura que el centre del diafragma de l'altaveu. Per tal d'actuar com a font de soroll i d'enregistrar les mesures al mateix temps, el sonòmetre s'ha calibrat abans de cada dia de mesura i configurat amb el mòdul d'analitzador de freqüències avançat, ponderació Z i mesures en terços d'octava de deu segons de duració. A més, per tal d'excitar l'altaveu, el sonòmetre actua com a font de soroll rosa enviant

el senyal a un amplificador de potència. S'ha elegit aquest tipus de soroll degut a que posseeix la mateixa energia per a totes les bandes de freqüència.

- BZ5503 Utility Software for Hand-held Analyzers: aquest programa facilitat pel fabricant Brüel&Kjaer i instal·lat a l'ordinador del laboratori s'ha utilitzat per tal d'exportar les dades enregistrades al sonòmetre en format de document Excel.
- Amplificador de potència Brüel&Kjaer 2716: mitjançant aquest amplificador de potència, el qual rebia la senyal de soroll rosa proporcionada pel sonòmetre, s'ha excitat l'altaveu.
- Giratutto: per tal de realitzar les mesures de directivitat cada 5º, s'ha utilitzat una taula giratòria on ubicar l'altaveu, controlada amb el software *Outline ET2/ST2 Automatic Electronic Turntable Control*.
- Baffle: caixa utilitzada per instal·lar l'altaveu 8BR40/N de Beyma i estudiar les diferents respostes introduïdes per les configuracions de caixa tancada i caixa Bass-reflex, a més de l'impacte d'utilitzar materials absorbents al seu interior.
- Altaveu Beyma 8BR40/N: altaveu utilitzat al llarg del projecte per tal d'estudiar la seua caracterització i comportament.

Mitjançant el material i la configuració esmentada, primerament s'ha mesurat la resposta freqüencial que ofereix l'altaveu instal·lat a la caixa tancada. De forma successiva, s'han mesurat la resposta oferida al revestir les parets interiors de la caixa amb material absorbent, primer amb un de tipus llana de 2 cm d'espessor i 300 g/m² de densitat i després, amb un de tipus manta de 3 mm d'espessor i 450 g/m² de densitat. Els resultats obtinguts es mostren a la figura 14.

A la figura 14 es representa en negre la resposta en freqüència per a la caixa tancada, en roig l'obtinguda a l'utilitzar absorbent de tipus llana i en blau a l'utilitzar absorbent de tipus manta. Com es pot observar, les tres respostes són quasi idèntiques llevat de: l'interval inferior als 31,5 Hz, on no cal esperar un bon funcionament de l'altaveu degut a estar per davall de la seua nova freqüència de ressonància $f_{0,B}$, i al voltant dels 100 Hz on la corba que representa la resposta freqüencial utilitzant absorbent de tipus llana es queda al voltant de 1 dB per baix de les altres.

Cal destacar el pendent que hi ha entre els 31,5 Hz i els 63 Hz, el qual s'aproxima als 30 dB/octava i dona pas a l'interval comprès entre els 63 Hz i els 2 kHz, on la resposta mitjanament plana representa les freqüències òptimes de treball. A més, es pot observar com la utilització d'absorbent tipus manta suavitza la resposta al voltant dels 80 Hz, 100 Hz i 800 Hz.

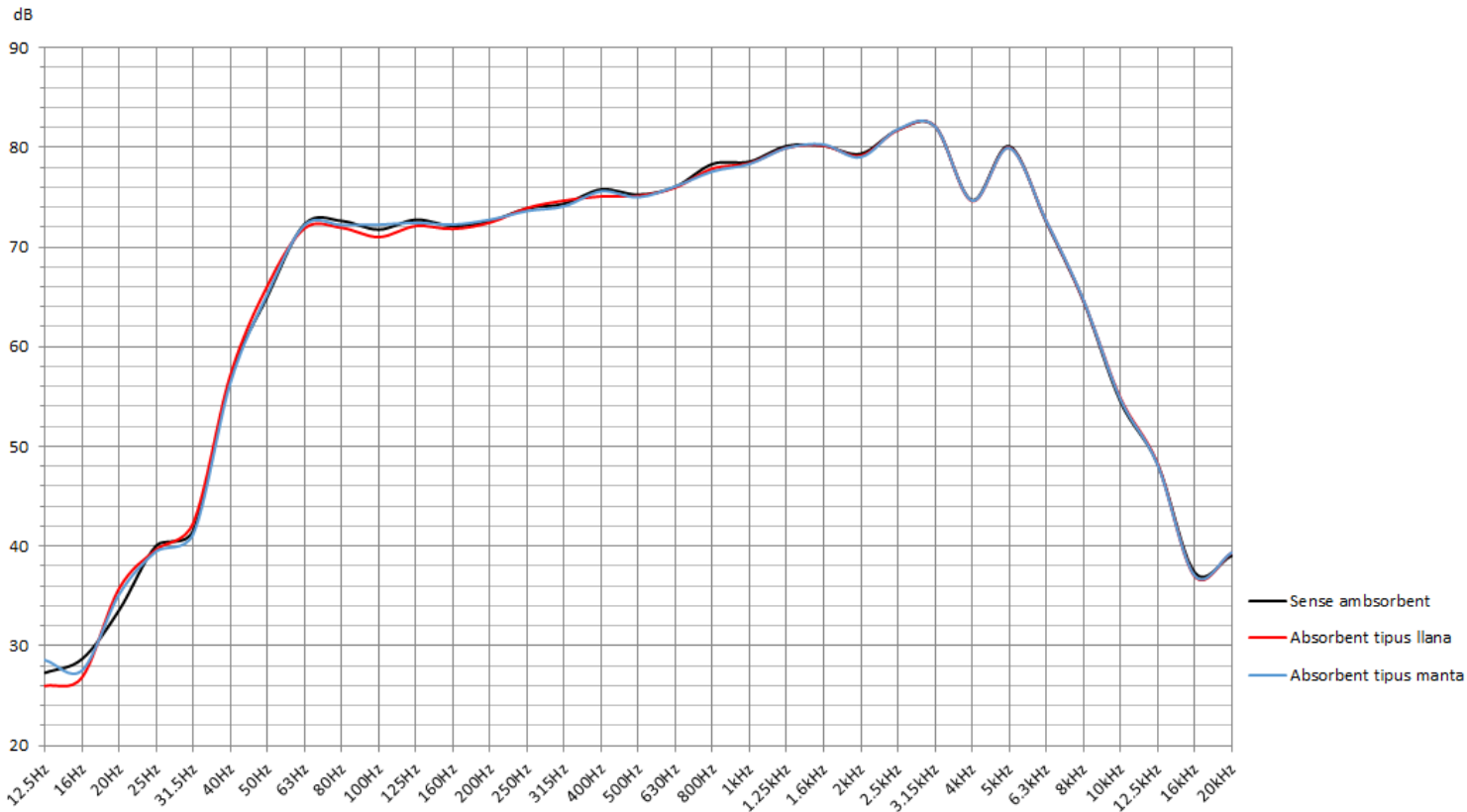


Figura 14: Corbes de resposta en freqüència per a la caixa tancada

Per altra banda, per tal d'estudiar la directivitat horitzontal del sistema, s'han realitzat mesures en intervals de 5°, des de la posició inicial de 0° que representa la part frontal de l'altaveu, fins als 180°, degut a que geometria de la caixa fa esperar una resposta idèntica per als 180° restants. D'aquesta forma s'han obtingut 37 mesures per a cada configuració de caixa, les quals estan plasmades i representades en intervals de terços d'octava a l'annex.

Amb els resultats obtinguts, es comprova com el sistema es comporta com una font omnidireccional per a les baixes freqüències, com s'observa a la figura 15 que representa la directivitat als 63 Hz. Per contra, quan augmentem la freqüència el sistema, aquest comença a comportar-se de forma similar a un patró subcardioid, perdent més intensitat al voltant dels 130° i 230°, com s'observa a la figura 16, que representa la directivitat del sistema en 500 Hz. A més, si continuem augmentant la freqüència, es pot observar com a partir dels 2 kHz el sistema adquireix un patró més direccional, donant-se diferències de pressió de més de 20 dB entre els 0° i l'interval comprès entre els 90° i els 270°, com podem observar a les figures 17 i 18, que representen el patró de directivitat de la font per als 2,5 kHz i els 16 kHz respectivament.

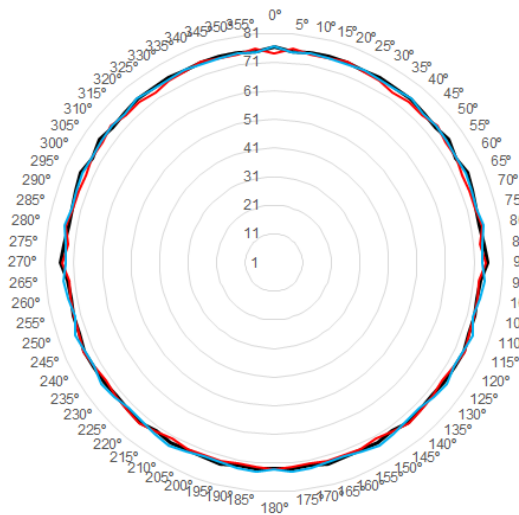


Figura 16: Directivitat caixa tancada als 63 Hz

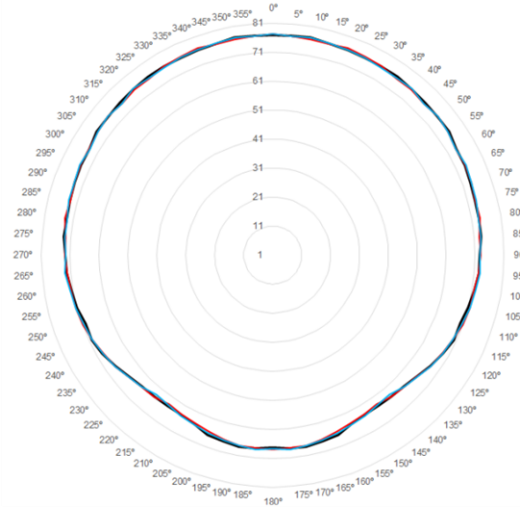


Figura 15: Directivitat caixa tancada als 500 Hz

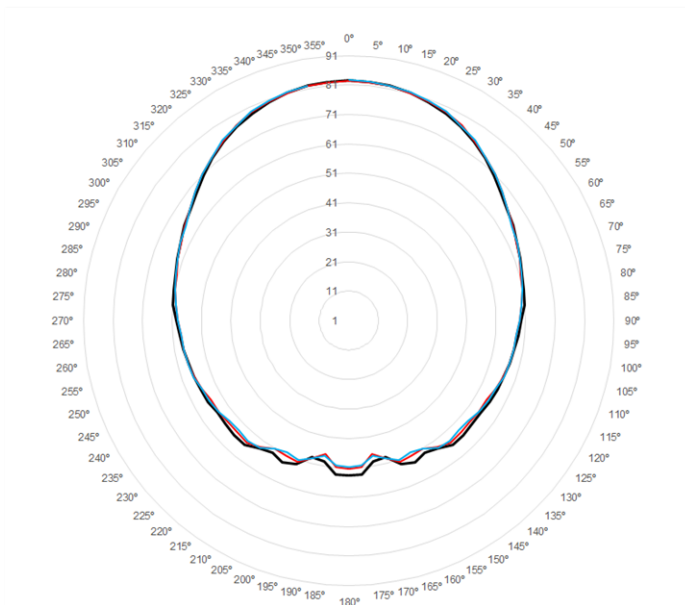


Figura 18: Directivitat caixa tancada als 2,5 kHz

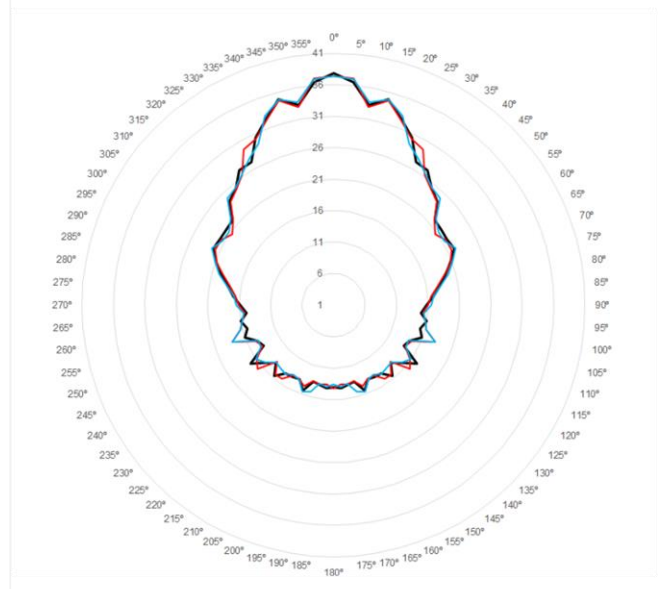


Figura 17: Diagrama directivitat caixa tancada a 16 kHz

Per tal de comparar els canvis introduïts a l'utilitzar els absorbents esmentats fins al moment, a les figures 15, 15, 17 i 18 es mostra en negre el patró de directivitat per a la caixa tancada, en roig el patró de directivitat a l'utilitzar absorbent de tipus llana i en blau el patró de directivitat a l'utilitzar absorbent de tipus manta. Com es pot observar, els canvis introduïts són mínims per a les freqüències que estan dins del rang de treball. A freqüències més altes es suavitzen de forma puntual alguns lòbuls, obtenint, per norma general, un resultat més uniforme amb l'absorbent de tipus manta.

Aplegats a aquest punt, ja es coneix de forma precisa la resposta freqüencial que presentarà el sistema, pel que es pot continuar i realitzar la simulació del disseny del sistema bass-reflex, tenint així una visió aproximada de quina serà la resposta final.

3.5 Simulació del sistema bass-reflex

Per tal d'agilitzar el procés de càlcul de les dimensions del port i obtenir una aproximació gràfica del resultat, s'ha fet servir el software de predicció acústica *WinISD*. Aquest programa permet elegir entre diversos altaveus de la base de dades o crear un nou que s'ajuste a les necessitats. A més, una vegada elegit l'altaveu i el tipus de caixa a simular, permet variar paràmetres com volum de caixa, forma i dimensions de port, correccions de forma... observant així el canvis que introduiran en la resposta del sistema.

En primer lloc, em creat un nou perfil d'altaveu introduint els paràmetres que caracteritzen l'altaveu utilitzat. A continuació, cal elegir la configuració de caixa desitjada, com per exemple tancada, bass-reflex, pas-banda de 4t ordre o pas-banda de 6t ordre, de forma que t'ofereix automàticament el volum de caixa i dimensions de port ideals per tal d'obtenir la resposta més plana possible i amb la màxima extensió de baixos. En el cas de l'altaveu utilitzat i amb una configuració bass-reflex, les condicions ideals per tal de tindre una extensió de baixos fins als 26 Hz amb resposta plana, es necessitaria una caixa de 142 l i un port de 10,2 cm de diàmetre i 19,7 cm de llargària. Si es compara el volum ideal front als 30 l que ofereix la caixa utilitzada, vegem que es tracten de dimensions molt allunyades de la realitat.

Per tal d'asegurar un bon funcionament del sistema, cal tindre en compte que la llargària del port no ha de ser major a la igual següent, on l_z representa la profunditat de la caixa i D_p el diàmetre del port:

$$L_{p,max} = l_z - \frac{D_p}{4}$$

A més, per tal ajustar-se als materials disponibles facilitats pel Departament d'Acústica de l'EPSC, els quals inclouen la caixa i tubs de metacrilat amb diàmetres interiors de 4, 5 o 6 cm i diferents llargàries, s'han elegit un diàmetre interior de 6 cm per tal de radiar major potència, limitant la llargària màxima del tub a $L_{p,max} = 15,3 - \frac{6}{4} = 13,8 \text{ cm}$. Tenint açò en compte, i després de simular diferents mides de port, s'han elegit dos tubs, un de 8,2 cm de llarg i l'altre de 11,2, els quals proporcionen les millores més notables i s'assemblen al les mides estàndard de mercat.

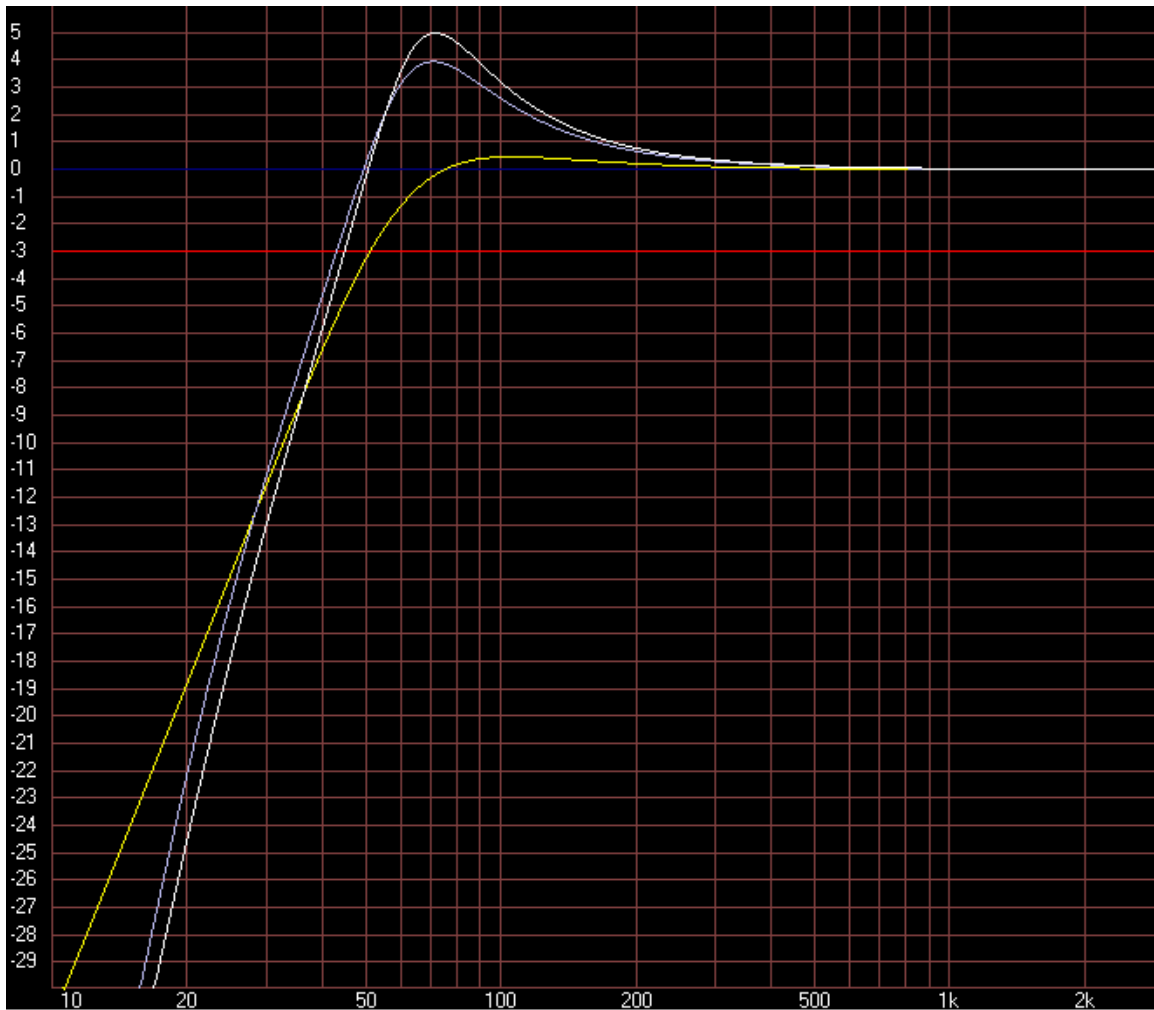


Figura 19: Simulació del guany per a cada tipus de caixa mitjançant el software WinISD

A la figura 19 es representa la resposta introduïda per: la caixa tancada, representada per la corba groga; el sistema bass-reflex amb un port de 6cm de diàmetre i 8,2 cm de llarg, representat per la corba blanca, i el sistema bass-reflex amb un port de 6 cm de diàmetre i 11,2 cm de llarg, representat per la corba blava. Segons les dades facilitades pel software, aquests ports tindran una freqüència de sintonia de 48,78 Hz i 43,59 Hz respectivament, la qual es veu augmentada degut al baix volum de la caixa.

Com es pot observar, mitjançant el sistema bass-reflex amb port de 8,2 cm de llargària es milloraria la resposta fins a 5 dB respecte al sistema de caixa tancada, expandint la resposta en freqüències baixes fins als 50 Hz per a un guany de 0 dB, 30 Hz més que amb el sistema de caixa tancada. Cal remarcar que amb un volum superior de caixa aquesta extensió seria major. A més, el port de 11,2 cm de llargària presenta una extensió mínimament major cap al baixos, per contra presenta un guany menor.

Aplegats a aquest punt, es decideix estudiar el comportament de les dues configuracions de port bass-reflex en un ambient real.

3.6 Remodelant de la caixa tancada

Per tal de millorar el disseny de la caixa tancada s'ha decidit convertir-la en un sistema bass-reflex, pel que s'haurà de fer una obertura on instal·lar el port. Com l'altaveu està instal·lat al centre de la caixa, equidistant dels extrems de la caixa, es decideix instal·lar el port a la part inferior de l'altaveu, de forma que equidiste dels laterals, de la part inferior del xassís de l'altaveu i de l'extrem inferior de la caixa, obtenint el resultat mostrat a la figura 20.

Per a fer l'obertura on instal·lar el port, s'han pres les mesures pertinents i s'ha dibuixat la grandària final que ha de tindre l'obertura. A continuació, s'ha practicat un forat amb una broca de fusta suficientment grossa, després, mitjançant una serra caladora s'ha buidat de forma aproximada l'obertura i, per últim, mitjançant una raspa de mitja lluna de dents mitjanes, s'ha llimat l'interior de l'obertura fins aconseguir la mida desitjada.

Amb l'obertura i l'interior de la caixa nets s'ha instal·lat el tub de metacrilat 8,2 cm de llargària, 6 cm de diàmetre interior i 7 cm de diàmetre exterior que actuarà com a port. Aquest, que no presentava quasi folgança, s'ha assegurat a la caixa mitjançant *Blu-Tack* i plastilina per tal de segellar el perímetre d'unió, evitant així pèrdues i facilitant el canvi d'aquest per realitzar les mesures amb el port de 11,2 cm de llargària.



Figura 20: Caixa tancada remodelada a bass-reflex

3.7 Resposta en freqüència i directivitat de les caixes bass-reflex

3.7.1 Sistema bass-reflex 8,2x6 cm

Seguint el procediment esmentat a l'apartat 3.4 per mesurar la resposta en freqüència i la directivitat de la font, s'han pres les mesures necessàries per tal d'estudiar la influència de convertir la caixa tancada en una caixa bass-reflex, constituïda per un port de 6 cm de diàmetre i 8,2 cm de llargària.

Primer s'han realitzat les mesures de resposta en freqüència de la caixa amb el sistema bass-reflex i a continuació, s'han repetit les mesures utilitzant l'absorbent de

tipus llana de 2 cm d'espessor i 300 g/m² de densitat i després utilitzant l'absorbent de tipus manta de 3 mm d'espessor i 450 g/m² de densitat.

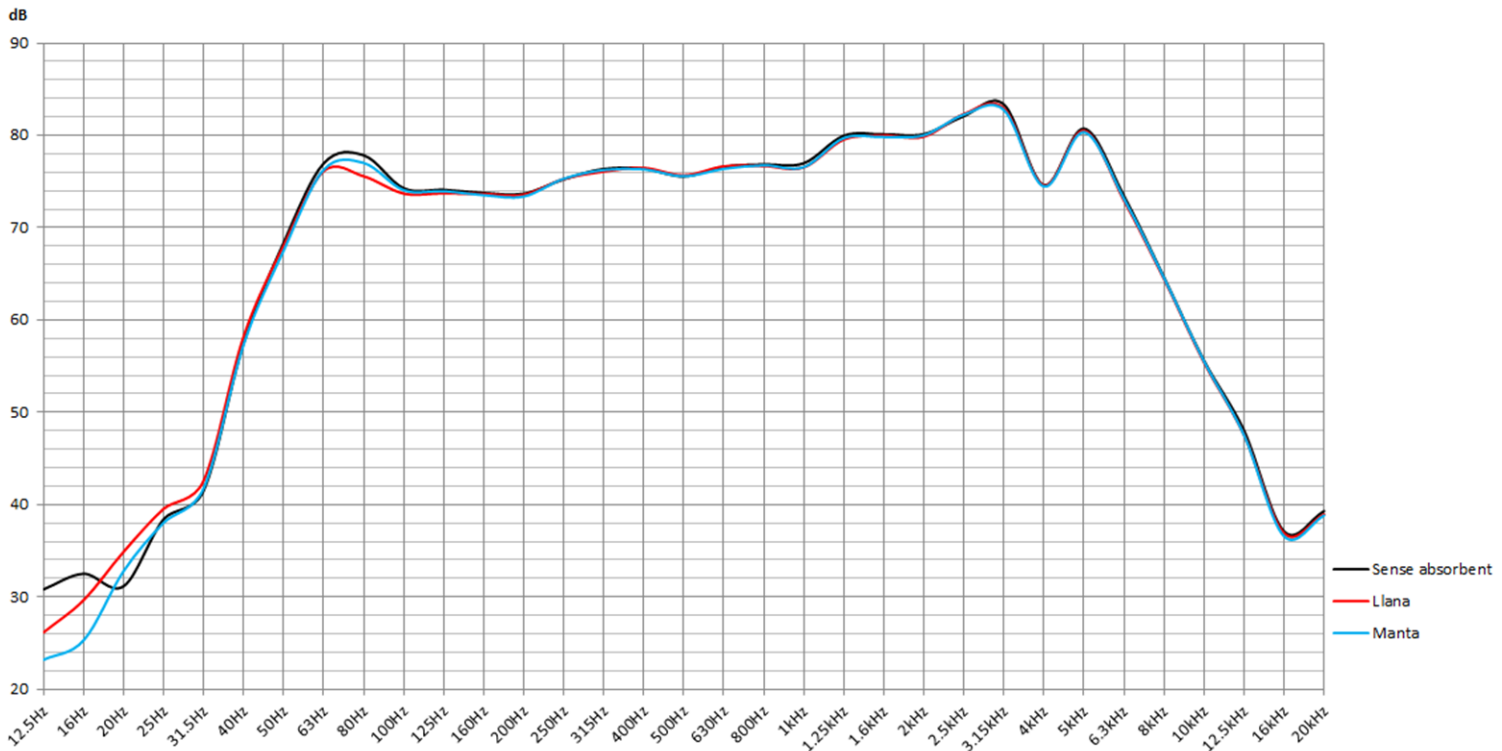


Figura 21: Respostes en freqüència caixa bass-reflex amb port D=6cm i L=8,2 cm

A la figura 21 es mostra en negre la resposta en freqüència per sistema bass-reflex, en roig l'obtinguda a l'utilitzar absorbent de tipus llana i en blau a l'utilitzar absorbent de tipus manta. Com es pot observar, el resultat es quasi idèntic per a les tres configuracions, llevat de l'interval inferior als 31,5 Hz el qual està molt per davall de la freqüència mínima de treball, i a l'interval entre els 63 Hz i els 100 Hz. És en aquest interval on s'accentua de forma notable el nivell de pressió, estant aquesta millora introduïda pel port que constitueix el sistema bass-reflex. En aquest interval es veu com la resposta per al sistema sense absorbent i amb absorbent de tipus manta difereix menys d'un decibel, mentre la corba roja es queda per baix de les dues decreixent abans i oferint una resposta menys accentuada.

A més, cal destacar la resposta aproximadament plana per a l'interval dels 100 Hz a 1 kHz i el pendent de hi ha entre els 31,5 Hz i els 63 Hz, aproximadament, que s'aproxima als 36 dB/octava.

Per altra banda, si ens fixem en els diagrames de directivitat, els quals estan representats de forma extensa a l'annex, vegem com aquesta no varia quasi de la comentada a l'apartat 3.4. S'observa el mateix comportament omnidireccional per a

les baixes freqüències i la mateixa evolució cap a una font directiva a mesura que es va augmentat la freqüència. Caldria destacar com en aquest cas, la utilització de l'absorbent tipus llana redueix al voltant de 2 dB el nivell de pressió per a orientacions de 90° i 270° al voltant dels 500 Hz, com s'observa a la figura 22. A més, a les freqüències més altes les quals estan fora del rang de treball de l'altaveu, com als 20 kHz, mentre els lòbuls secundaris disminueixen en un poc dB al utilitzar absorbent, els lòbuls que pertanyen als 45° i 315° es veuen accentuats, observant-ho així a la figura 23.

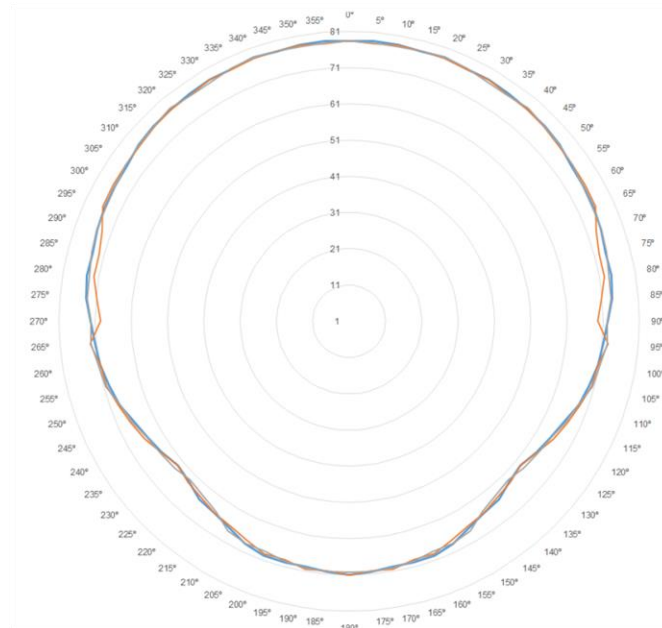


Figura 22: Diagrama de directivitat als 400 Hz per al sistema bas-reflex amb port $D=6\text{cm}$ i $L=8,2$, sense amb sorbent i amb llana i manta

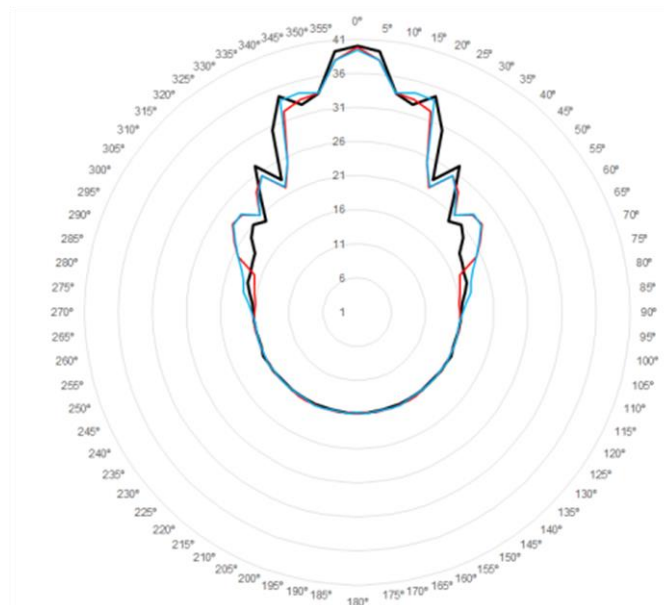


Figura 23: Diagrama de directivitat als 20 kHz per al sistema bas-reflex amb port $D=6\text{cm}$ i $L=8,2$, sense amb absorbent i amb llana i manta

3.7.2 Sistema bass-reflex 11,2x6 cm

Igual que l'apartat, s'han pres les mesures necessàries per tal d'estudiar la influència de convertir la caixa tancada en un sistema bass-reflex, en aquest cas constituït per un port de 6 cm de diàmetre i 11,2 cm de llargària.

Primer s'han realitzat les mesures de resposta en freqüència de la caixa amb el sistema bass-reflex i a continuació, s'han repetit les mesures utilitzant l'absorbent de tipus llana de 2 cm d'espessor i 300 g/m² de densitat i després utilitzant l'absorbent de tipus manta de 3 mm d'espessor i 450 g/m² de densitat.

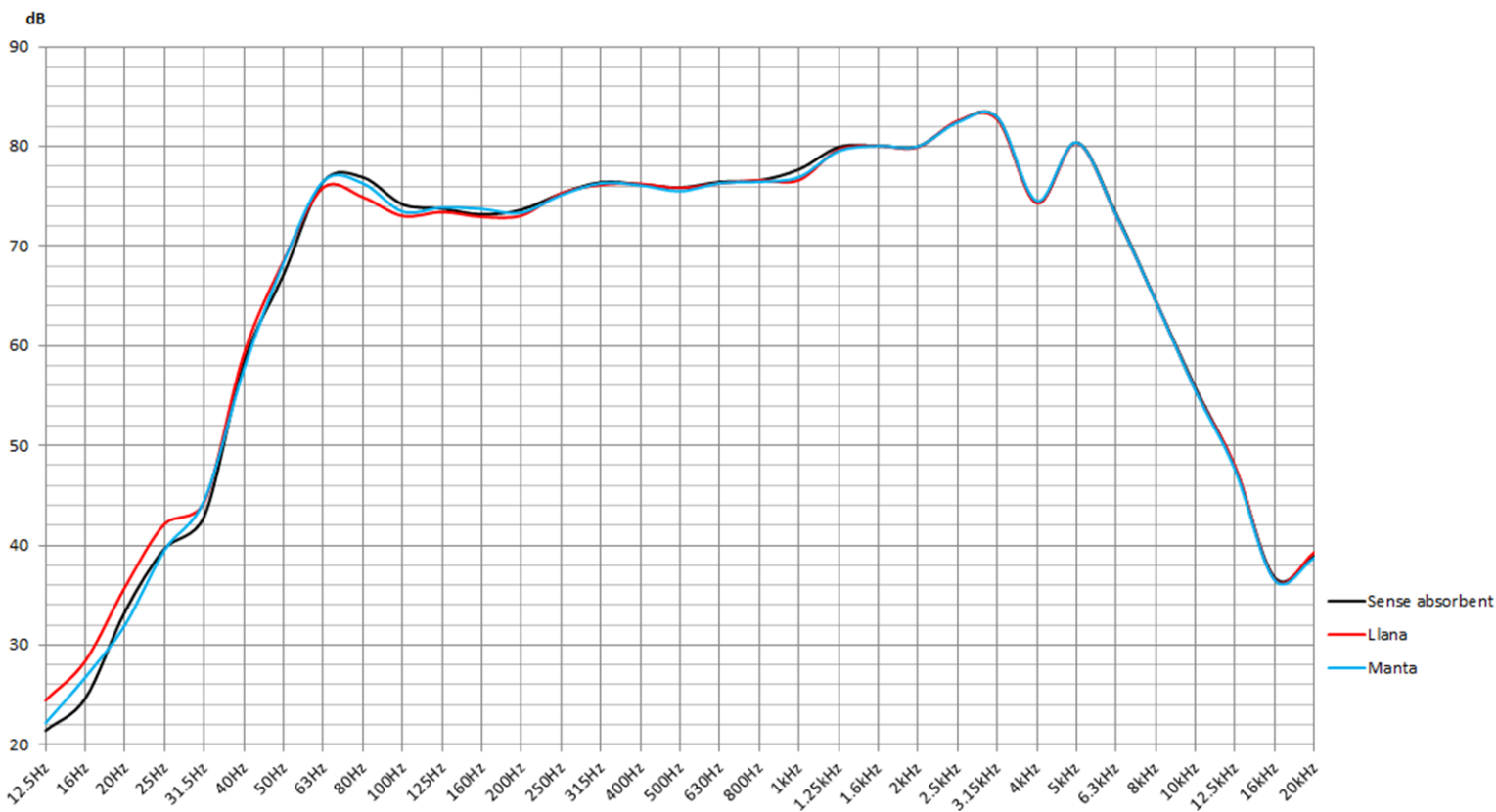


Figura 24: Respostes en freqüència caixa bass-reflex amb port D=6cm i L=11,2 cm

Com es pot observar a la figura 24, on es mostra en negre la resposta en freqüència per al sistema bass-reflex sense absorbent, en roig la resposta a l'utilitzar absorbent de tipus manta i en blau la resposta a l'utilitzar absorbent de tipus llana, el resultat obtingut és molt simular, llevat de l'interval inferior als 31,5 Hz, el qual està molt per d'avall de la freqüència mínima de treball. A l'interval entre els 63 Hz i els 100 Hz es pot observar l'aportació del sistema bass-reflex que augmenta al voltant de 4 dB el nivell de pressió sonora, tornant a estar per davall la resposta per a la configuració

que utilitza l'absorbent de tipus llana, què comença a decreix abans. A més, al voltant dels 160 Hz l'absorbent de tipus manta presenta una millor resposta que les altres configuracions aportant un xicotet increment al nivell que suavitza la resposta freqüencial, creant així un perfil més pla.

Si analitzem la directivitat, no observem gran canvis en comparació amb les altres configuracions. Es continua mantenint el procés d'augment de la directivitat descrit a l'apartat 3.4 i tant a baixes com a mitges freqüències les tres configuracions presenten un patró similar. Cal destacar com a mesura que augmenta la freqüència, l'absorbent de tipus llana fa que els lòbuls varien de forma més abrupta, mentre que l'absorbent tipus manta encara que els retalla en comparació amb no utilitzar absorbent, aquests no es queden tant definits com amb la llana.

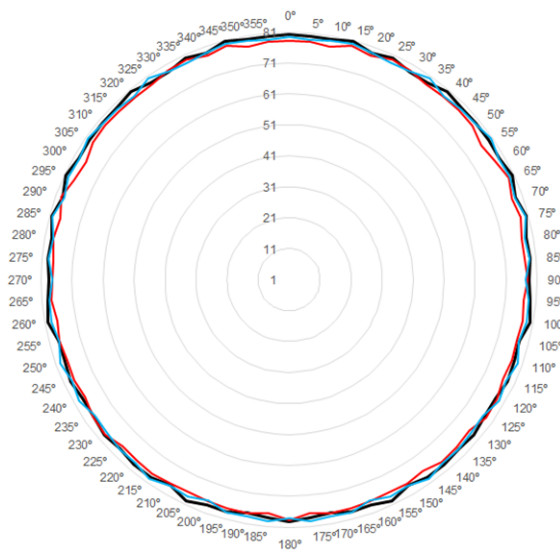


Figura 25: Directivitats als 80 Hz per a la caixa bass-reflex amb port D=6 cm i L=11,2

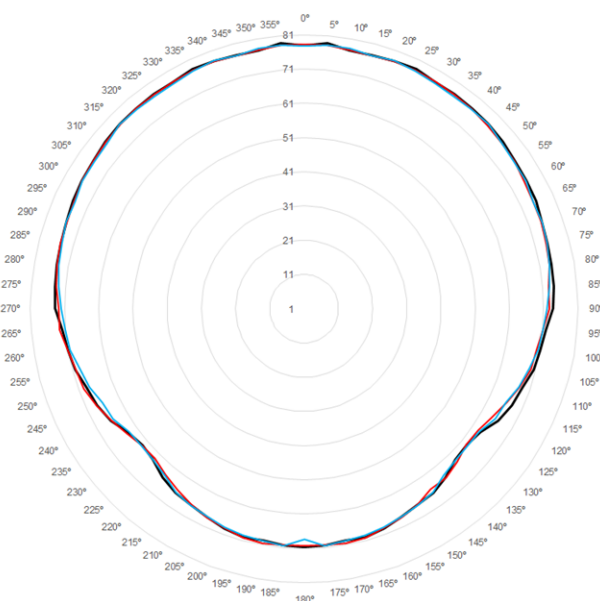


Figura 26: Directivitats als 400 Hz per a la caixa bass-reflex amb port D=6 cm i L=11,2

3.8 Comparativa de les tres caixes

Aplegats a aquest punt, per tal de determinar la millora introduïda mitjançant la configuració de caixa bass-reflex front a la caixa tancada, cal comparar els tres models de caixa estudiats comparant les seues respostes freqüencials per tal de trobar la millor resposta.

En primer lloc, a la figura 27 es compara la resposta freqüencial per als tres tipus de caixa sense absorbent, representant en negre la caixa tancada, en roig el sistema bass-reflex amb el port de 8,2 cm de llargària i en blau el port de 11,2 cm. Com es pot observar, les caixes amb el sistema bass-reflex aporten una millora notable al voltant dels 63 Hz i 80 Hz d'uns 4 dB i 5 dB, per al port 11,2 cm de llargària i el de 8,2 cm de llargària respectivament. En quant a l'extensió cap als baixos, no es massa bona però augmenta en quasi 10 Hz, sent lleugerament superior per al port de 8,2 cm. També cal destacar com les resposta dels 100 Hz a 1 kHz es quasi plana, variant en poc mes de 2 dB, mentre que per a la caixa tancada aquesta augmenta de forma més o menys progressivament fins als 6 dB de diferència.

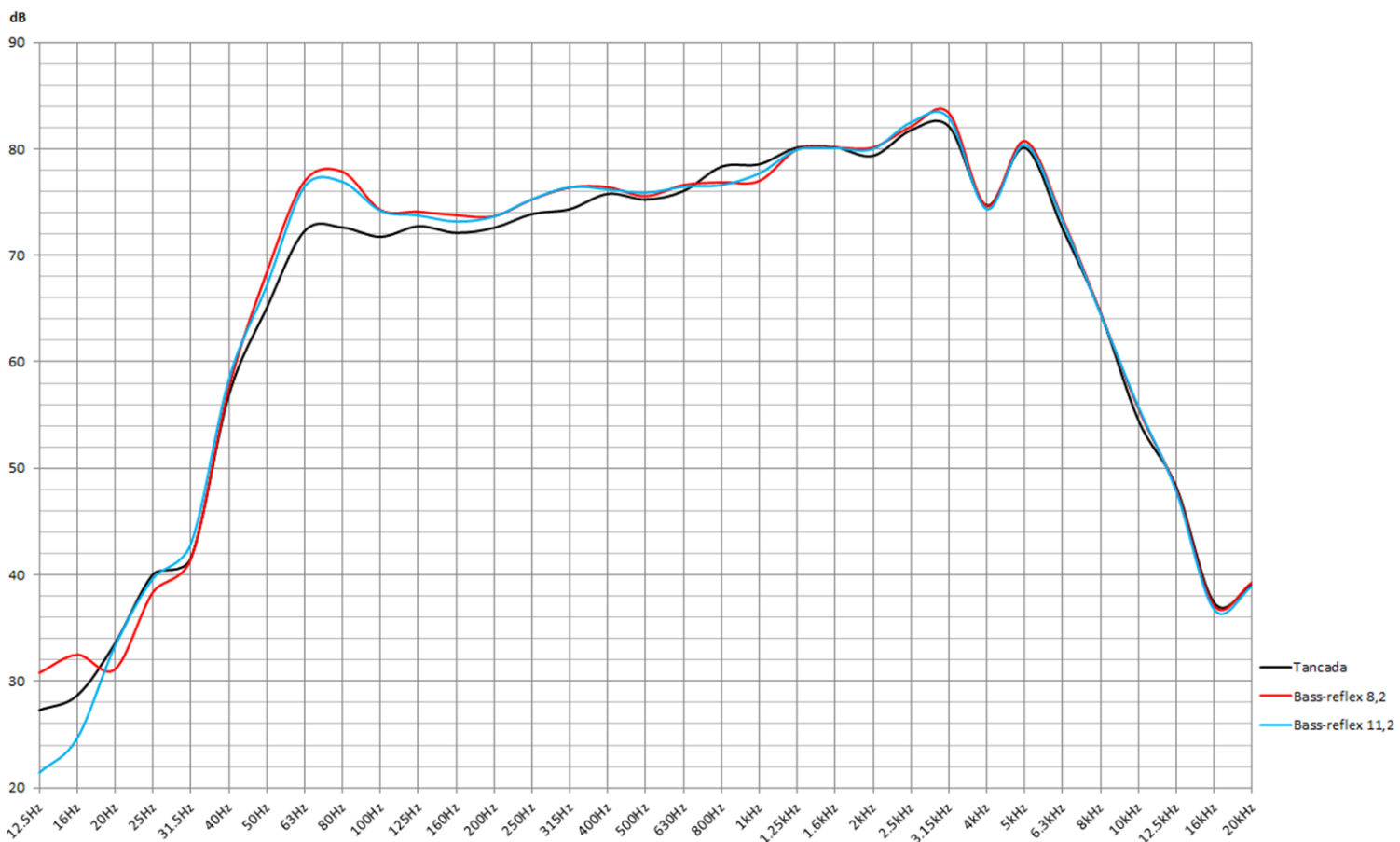


Figura 27: Respostes en freqüència per als tres tipus de caixa sense absorbent

En segon lloc, a la figura 28, seguint el mateix codi de colors en la representació, es compara la resposta freqüencial dels tres tipus de caixa revestits amb absorbent de tipus llana de 2 cm d'espessor i 300 g/m² de densitat. Com s'observa a la gràfica, les caixes amb el sistema bass-reflex continuen aportant una millora significativa d'uns 4dB al voltant dels 63 Hz i els 80 Hz i encara que en menor mesura, el port de 8,2 cm continua estant per damunt de les altres dues configuracions. En aquest cas l'extensió cap als baixos és mínimament major i la resposta entre els 100 Hz i 1 kHz, sobretot per al sistema amb port de 8,2 cm de llargària, és més plana que al cas anterior on no s'utilitzava absorbent.

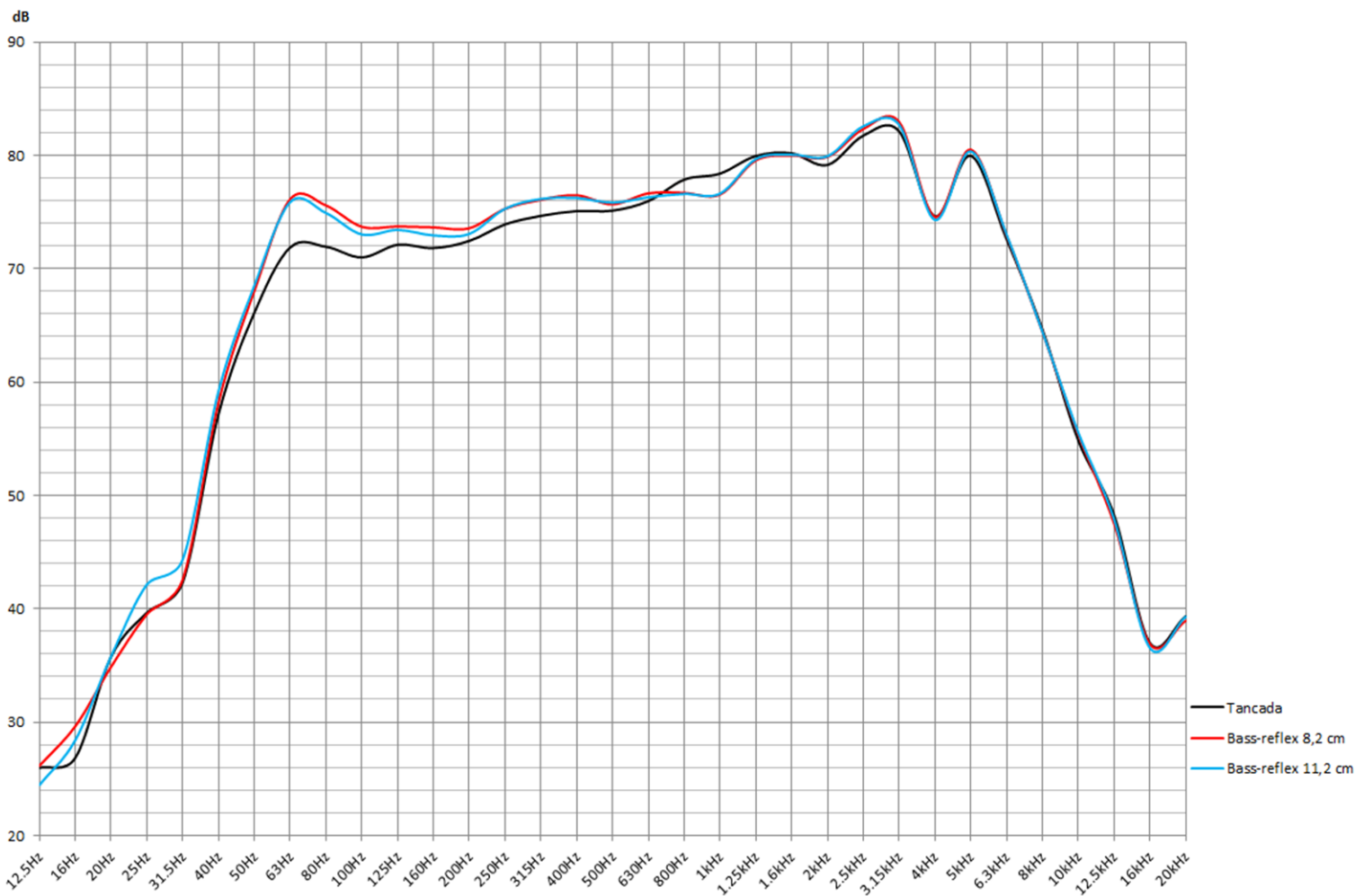


Figura 28: Respostes en freqüència per als tres tipus de caixa amb absorbent tipus llana

En tercer lloc, a la figura 29, seguint el mateix codi de colors es representa la resposta en freqüència per als tres tipus de caixa utilitzant absorbent de tipus manta de 3 mm de grossor i 450 g/m² de densitat. En aquest cas, la millora introduïda pels ports és quasi igual a la dels sistemes sense absorbent, quedant unes dècimes de dB per baix, continuant estant al capdavant el port de 8,2 cm de llargària. Per contra,

trobem una mínima millora d'extensió cap a les baixes freqüències i resposta més plana i suavitzada que als dos casos anteriors.

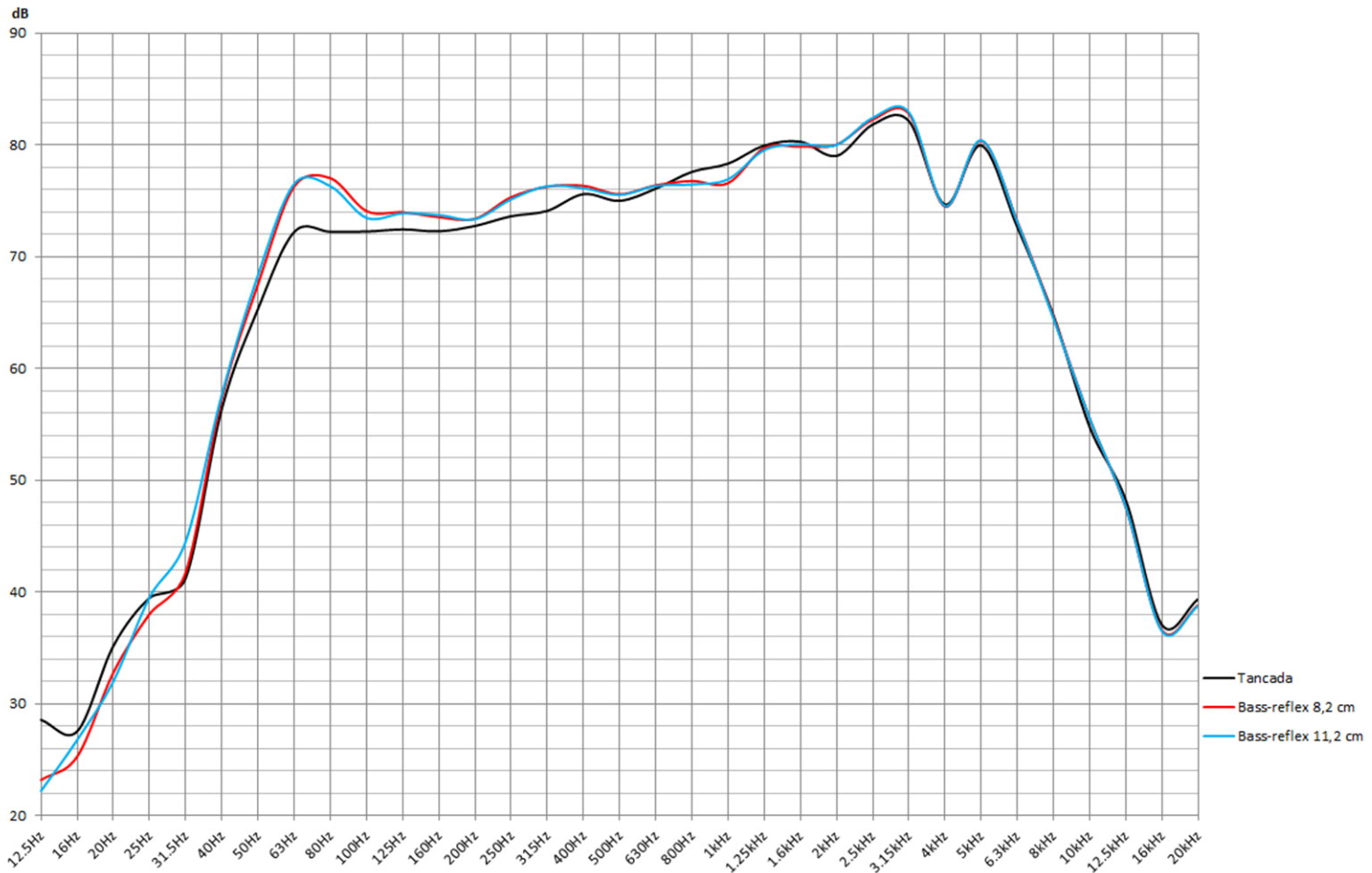


Figura 29: Respostes en freqüència per als tres tipus de caixa amb absorbent tipus manta

Aplegats a aquest punt, es veu com les millors respostes freqüencials han sigut aportades pel sistema bass-reflex, amb un port de 6cm de diàmetre i 8,2 cm de llargària, sense revestiment interior i amb l'absorbent de tipus manta, coincidint amb la configuració simulada que proporcionava un millor guany. Aquest guany es quantificava a la simulació en +5dB, aproximadament, per a freqüències al voltant dels 70 Hz, i amb una extensió cap a les baixes freqüències per a la freqüència de tall d'uns 6 Hz, pel que es pot afirmar com aquestes prediccions s'han acomplert en gran mesura.

Comparant els diagrames de directivitat comentats en anterioritat, es veu com la utilització de material absorbent de tipus manta de 3mm de grossor i 450 g/m^2 de densitat aporta una suavització als diagrames de directivitat. Pel que s'elegeix que la millor solució per tal de millorar el rendiment de l'altaveu Beyma 8BR40/N és transformar el recinte tancat en un recinte de tipus bass-reflex, el qual estarà constituït per un port de 6 cm de diàmetre i 8,2 cm de llargària, revestit amb el material tipus manta utilitzat.

4. Conclusions

Els objectius que es volien assolir al plantejar aquest projecte englobaven la coneixença teòrica-pràctica dels elements, ferramentes i procediments necessaris per tal de poder construir dues caixes bass-flex per a un altaveu determinat, de forma que és pogués quantificar la millora introduïda per aquest sistema i per la utilització de materials absorbents que pogueren millorar les condicions de disseny.

Com s'observa al llarg del projecte, aquests objectius han sigut aconseguits mitjançant l'estudi previ dels factors que intervindrien al projecte i els diferents processos de simulació, construcció i caracterització seguits per tal d'obtenir les dades necessàries que permeteren un disseny adequat i una interpretació quantitativa dels objectius.

Després de realitzar les mesures i càlculs pertinents, s'han caracteritzat tant els paràmetres mecànics i elèctric que oferiria l'altaveu com la seua resposta en freqüència i directivitat al ser instal·lat en una caixa tancada. D'aquesta forma, s'han pogut comparar els resultats per a aquest cas amb els resultats obtesos al caracteritzar la resposta en freqüència i directivitat dels les dues caixes bass-reflex dissenyades i construïdes.

Aquestes caixes bass-reflex dissenyades, les quals han derivat de la millora d'una caixa tancada d'uns 30 l de volum, estan constituïdes per un port de 6 cm de diàmetre i 8,2 cm de llargària per a un disseny i de 6 cm de diàmetre i 11,2 cm de llargària per a l'altre. Mitjançant aquesta configuració, s'ha obtingut una millora d'entre 4 i 5 dB a les freqüències compreses entre els 63 Hz i els 80 Hz, una millora de quasi 2 dB per a quasi totes les freqüències compreses entre els 80 Hz i 400 Hz i una extensió d'uns 10 Hz cap a les baixes freqüències, podent comprovar així com la utilització de caixes bass-reflex millora la resposta en freqüència per als greus i no afecta de forma considerable a la directivitat de la caixa.

A més, durant tot el procés de mesura, s'ha caracteritzat la resposta introduïda al utilitzar diferents materials absorbents per tal de revestir l'interior de les caixes. En aquest cas, els resultats obtinguts no han estat a l'altura dels esperats, ja que encara que per norma general han suavitzat les respostes en freqüència i directivitat, no han introduït un guany positiu en comparació a les caixes sense absorbent. Aquest fenomen s'ha pogut donar per una mala col·locació de l'absorbent a l'interior de la caixa, pel que en futurs projectes caldrà tindrà més cura i precisió per tal de poder potenciar l'efecte que els absorbents ofereixen.

En última instància, s'accepta el disseny de la caixa bass-reflex, constituïda per un port de 6 cm de diàmetre i 8,2 cm de llargària i revestida interiorment amb

material absorbent de tipus manta de 3 mm de grossor i 450 g/m^2 , com el disseny més favorable, ja que presenta major guany i extensió per a baixes freqüències i una resposta més plana i suau respecte als altres dissenys i combinacions d'absorbent.

Per últim, com a futures línies de treball, es considera la creació d'una nova caixa bass-reflex de major volum que estarà constituïda per un sistema de 3 vies amb els seus respectius filtres i un revestiment interior d'absorbent instal·lat de forma adequada. A més, per tal de millorar el disseny s'introduiran correccions de forma al tub que constitueix el port bass-reflex per tal de poder amplificar la potència radiada.

5. Bibliografia

Algibe Rubio, Oscar. Dispositivos: Altavoces. < www.info-ab.uclm.es/labeledec/Solar/Otros/Audio/html/altavoces.html > [Última consulta: Agost 2016]

Beraneck L., Leo. (1993). Acoustics.

Blanco García, Angel. Curso interactivo de física en internet: Oscilaciones. <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/oscilaciones/mas/mas.htm>> [Última consulta: Agost 2016]

FISICALAB. El movimiento harmónico simple. <<https://www.fiscalab.com/apartado/concepto-oscilador-armonico#contenidos>> [Última consulta: Agost 2016]

García Puertas, Carlos. Diseño de cajas acústicas <<http://aholab.ehu.es/users/imanol/akustika/lkastleLanak/Dise%F1o%20de%20cajas%20acusticas.pdf>> [Última consulta: Agost 2016]

Miyara, Federico. Introducción a la electroacústica. <<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/audio/electroac.pdf>> [Última consulta: Agost 2016]

Miyara, Federico. Parámetros de Thielle-Small. <<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/audio/thiele-small.pdf>> [Última consulta: Agost 2016]

Ramis J., Alba J., Martínez J., y Espinosa V. (2002). El transductor dinámico. SPUPV.

Ramis Soriano, J., Pueo Ortega, B., Uris Martinez, A. (1996) Diseño de sistemas bass-reflex. SPUPV.

Small, Richard H., Vented-Box loudspeaker systems. Versió Traduït <http://www.che.es/directorio/albums/userpics/10001/Bass_Reflex1~0.pdf> [Última consulta: Agost 2016]

UNE-EN 60268-5:2004. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces

UNE-EN 60268-5:2004/A1:2011. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces