

Herramientas de programación en python para el análisis del diseño de cajas acústicas

December 15, 2020



ACUS225 - Cajas Acústicas

Docente: Dr. Rodolfo Venegas

Alumno: Diego Espejo

Abstract

Dentro del mundo de la escucha, ya sea casual o dedicada, los altavoces están como uno de los elementos mas importantes de esta, por lo cual es importante el poseer un altavoz de buena calidad. Saber si este es de buena calidad o no, es necesario leer sus especificaciones técnicas, sin embargo, en el caso mas desfavorable se tendría un altavoz con malas características lo cual se podría solucionar rediseñando la caja en donde estará empotrada la bocina. Esta nueva configuración deberá contribuir de manera positiva al rendimiento del altavoz.

En este documento se presenta un set de herramientas implementadas en lenguaje python para poder analizar de manera preliminar diferentes diseños de altavoces.

Indice

1. Terminos Relacionados

1. Parametros Thiele-Small
2. Cajas Simples
 - Caja cerrada
 - Presencia de material poroso
 - Reflectores de bajo
 - Red de 2 puertos para un gabinete con reflector de bajos
 - Tipo 1^[2].
 - Tipo 2^[2].

2. Metodología

3. Paquete loudspeaker_box

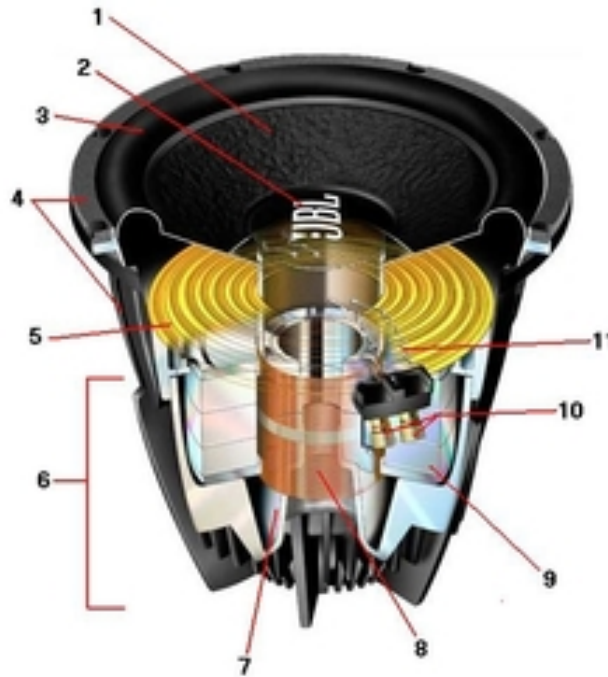
1. main
2. closed_box
3. JCAL
4. open_box
5. utils
6. mediciones

4. Glosario de simbolos

5. Referencias Bibliograficas

1 Terminos Relacionados

- Un parlante, en términos físicos, es un circuito electro-mecano-acústico, que está principalmente compuesto por una bobina (el elemento eléctrico), un diafragma (el elemento mecánico) y un encierro (el elemento acústico).
- Como se ve en la imagen 1 tenemos todos los componentes de un altavoz, las cuales son:



1. Cono
2. *Dust cap*
3. *Surround*
4. *Spider*
5. Canasta
6. Estructura motriz
7. *Pole piece*
8. Bobina/*former*
9. Imanes
10. Terminales
11. *Tinsel leads*

La combinación de todos estos elementos nos entregaran diversas características electro-mecano-acústicas, las cuales estan representados mediante los parametros de Thiele-Small

1.1 Parametros de Thiele-Small

Los creadores de estos parametros son A. Neville Thiele y Richard H. Small, quienes dieron estos parametros con el fin de describir el funcionamiento de un parlante a bajo nivel.

Estos valores pueden ser obtenidos a traves de los valores de medición de la impedancia de entrada del altavoz, de la siguiente manera:

$$X_{max} = \frac{\max Z_e}{R_e}$$

$$X_{mech} = \sqrt{X_{max}}$$

$$Q_{MS} = \frac{f_s \times X_{mech}}{f_2 - f_1} = \frac{f_s \times X_{mech}}{Q}$$

$$Q_{ES} = \frac{Q_{MS}}{X_{max} - 1}$$

$$R_{ES} = R_E \times (X_{max} - 1)$$

$$C_{MS} = \frac{Q_{MS}}{\omega_s \times R_{ES}}$$

$$BL = \sqrt{\frac{L_E}{C_{MS}}}$$

$$R_{MS} = \frac{(BL)^2}{R_{ES}}$$

$$SD = r^2 \times \pi$$

1.2 Cajas acústicas

- Los parametros anteriormente señalados son esenciales para el diseño de cajas acústicas.

1.2.1 Caja cerrada

La teoría de cajas cerradas propone que un altavoz instalado en una caja se puede escribir como un circuito electro-mecano-acústico, como el que se ve a continuación.

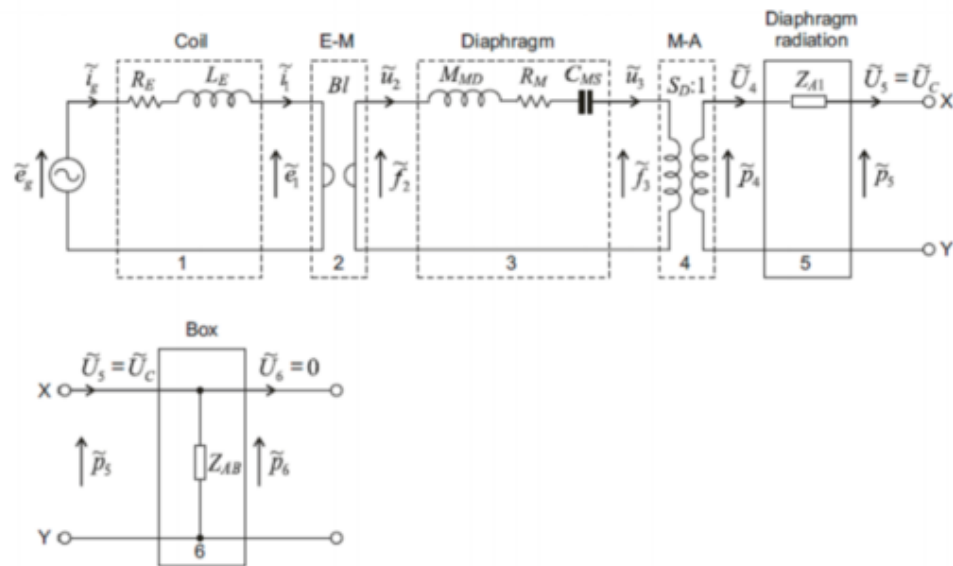


FIG. 7.19 Semi-analytical model of example closed-box enclosure design shown in Fig. 7.18, using transmission matrices.

En la figura se aprecian 6 secciones de este circuito que cada una representa parte del proceso de transmitir una onda sonora a través de una caja acústica.

La primera fase *coil* o bobina nos muestra lo que viene siendo la parte eléctrica del sistema. Luego viene *E-M* en donde ocurre la conversión del sistema de eléctrico a mecánico. Entrando en la sección mecánica tenemos el *Diaphragm*, en castellano, el diafragma, cuyo comportamiento es similar a un sistema masa-resorte. La fuerza que atraviesa el circuito mecánico del diafragma es transformada a presión en la interfase del diafragma, cambiando de sistema a uno acústico (*M-A*). En esta última fase del sistema *E-M-A*, tenemos la interacción del diafragma con el aire (*Diaphragm radiation*) y con el gabinete (*box*).

Cada uno de estos procesos o secciones tiene asociado una matriz de transferencia, que va transformando las variables de entrada, como la corriente y voltaje o características del altavoz, hasta obtener finalmente una presión de salida.

- Bobina

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_g \\ \dot{i}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{e}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} \bar{e}_1 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix}$$

Donde $Z_e = R_e + j\omega L_e$

- E-M

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_1 \\ \bar{i}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Bl \\ \frac{1}{Bl} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{f}_2 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \bar{f}_2 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix}$$

- Diafragma

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_2 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{MD} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{f}_3 \\ \bar{u}_3 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} \bar{f}_3 \\ \bar{u}_3 \end{bmatrix}$$

Donde $Z_{MD} = R_{MS} + j\omega M_{MD} + \frac{1}{j\omega C_{MS}}$

- M-A

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_3 \\ \bar{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_D & 0 \\ 0 & \frac{1}{S_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_4 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \bar{p}_4 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix}$$

- Radiación del diafragma

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_4 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix}$$

Con $Z_r = R_r + jX_r$

Donde $R_r = Z_0 \left(1 - \frac{J_1^*(2k_0a)}{k_0a}\right)$ y $x_r = Z_0 \frac{H_1^{**}(2k_0a)}{k_0a}$

(*) La función $J_1(z)$ corresponde a la función de Bessel de orden 1.

(**) Es la función de Struve de orden 1 $H_1(x)$.

- Gabinete

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{AB}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix}$$

Finalmente está la impedancia de la caja Z_{AB} que podra variar en caso de tener o no material poroso para el caso de un gabinete cerrado tendremos que $\bar{U}_6 = 0$, por lo tanto esta ultima expresión para este caso sería :

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{AB}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ 0 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

A partir de este sistema E-M-A se puede formular una unica matriz de transferencia producto de multiplicar todas las ya mencionadas, la cual se denomina A .

$$\begin{bmatrix} \bar{e}_g \\ \bar{i}_g \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Con } A = CEDMFB$$

Presencia de material poroso La penultima matriz de transferencia nos presenta Z_{AB} que es la impedancia de la caja, la cual vera su configuración modificada si hay presencia de material poroso como revestimiento interno de ella. Tenga esta caja cerrada un volumen dado por $V_b = l_x l_y l$. Si no posee material poroso su ecuación relacionada a la impedancia de la caja será:

$$Z_{AB} = -j \frac{Z_0}{l_x l_y} \cot k_0(l)$$

De caso opuesto, de poseer revestimiento:

$$Z_{AB} = \frac{1}{l_x l_y} \frac{Z_{wp} Z_{wa} + Z_0^2}{Z_{wp} + Z_{wa}}$$

Con

$$Z_{wa} = -j Z_0 \cot(k_0 l_z)$$

y

$$\begin{aligned} Z_{wp} &= -j Z_c \cot(k_c d) \\ l &= l_z + d \end{aligned}$$

El valor de Z_c y k_c se obtienen mediante el modelo *JCAL* (Johnson et al. J. Fluid Mech 1987, Champoux & Allard, J. Appl. Phys. 1991, Larfarge et al, JASA 1997). El primer termino se calcula de la siguiente manera:

$$Z_c = \sqrt{\frac{\rho(\omega)}{C(\omega)}} = \sqrt{\frac{\eta}{j\omega\kappa(\omega)C(\omega)}}$$

y el segundo

$$k_c = \omega \sqrt{\rho(\omega)C(\omega)} = \sqrt{\frac{\eta C(\omega)}{j\omega\kappa(\omega)}}$$

Donde $C(\omega)$ es

$$C(\omega) = \frac{\phi}{P_0} \left(1 - j\omega\rho_0 C_p \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\theta(\omega)}{k\phi} \right)$$

$\kappa(\omega)$ y $\theta(\omega)$ se obtiene a partir de una funcion de escalamiento X_ω que consiste en:

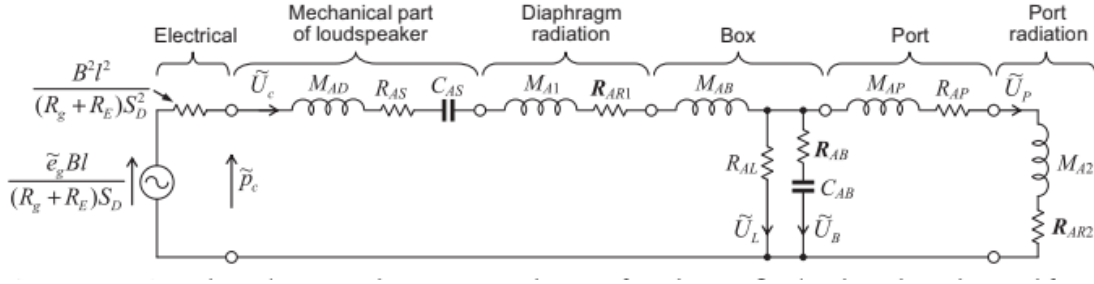
$$X_\omega = X_0 \left(\frac{j\omega}{\bar{\omega}} + \sqrt{1 + \frac{j\omega}{\bar{\omega}} \frac{M}{2}} \right)$$

Donde X_0 puede tomar valores de κ_0 o θ_0 , $\bar{\omega}$ puede tomar los valores de ω_v o ω_t y M puede ser M_v o M_t estan variaciones dependeran si queremos calcular $\kappa(\omega) = X_\omega(\kappa_0, \omega_v, M_v)$ o si queremos $\theta(\omega) = X_\omega(\theta_0, \omega_t, M_t)$.

1.2.2 Reflectores de bajo *Bass Reflex*

Con el modelo anteriormente señalado, si se desea mejorar su respuesta en bajas frecuencias la primera solución sería aumentar las dimensiones de la caja lo que eventualmente produciría problemas ergonómicos. Sin embargo, el añadir elementos acústicos al sistema E-M-A nos podrían aportar mejoras a este inconveniente. Este elemento sería un puerto en la estructura de la caja, haciendo que cuando el diafragma vibre, parte de su desplazamiento comprima el aire contenido en la caja y el resto del desplazamiento mueva el aire hacia afuera por el puerto haciendo que este agujero en la estructura se comporte como un segundo diafragma.

La matriz que representa todo este nuevo sistema es acorde a este circuito



el cual es bastante similar a la de una caja cerrada, se contempla añadir las matrices asociadas a su nuevo elemento y a su interacción con el resto del sistema.

- Radiación del diafragma

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_4 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{A1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix}$$

Con $Z_{A1} = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{S_D}$

Donde $Z_{11} = Z_0 \left[\left(1 - \frac{J_1(k_0 a)}{k_0 a} \right) + j \frac{H_1(k_0 a)}{k_0 a} \right]$ y si $k_0 a \ll 1$ y $s \gg a$, se tiene que

$$Z_{12} \approx Z_0 \frac{k_0^2 a^2}{2} \left(\frac{\sin(k_0 s)}{k_0 s} + j \frac{\cos(k_0 s)}{k_0 s} \right)$$

- Fugas

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_5 \\ \bar{U}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{R_{AL}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \bar{p}_6 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix}$$

- Puerto

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_7 \\ \bar{U}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_p t) & j \frac{Z_p}{S_p} \sin(k_p t) \\ j \frac{S_p \sin(k_p t)}{Z_p} & \cos(k_p t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_8 \\ \bar{U}_8 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \bar{p}_8 \\ \bar{U}_8 \end{bmatrix}$$

$$k_p = \omega \sqrt{\frac{\eta C_p}{j \omega \kappa_p}} \text{ y } Z_p = \sqrt{\frac{\eta}{j \omega \kappa_p C_p}}$$

- Radiación del puerto

$$\begin{bmatrix} \bar{p}_8 \\ \bar{U}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{A2}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_9 \\ \bar{U}_9 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \bar{p}_9 \\ \bar{U}_9 \end{bmatrix}$$

$$Z_{A2} = \frac{Z_0}{S_p} \left[\left(1 - \frac{J_1(2k_0 a)}{k_0 a} \right) + j \frac{H_1(2k_0 a)}{k_0 a} \right]$$

Al añadir estas nuevas matrices, tenemos que nuestra matriz de transferencia total será:

$$A = CEDMFLBPR = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

Para obtener tanto $G(s)$ como Z_E de este tipo de cajas, la literatura^[1] nos recomienda lo siguiente:

$$G(s) = \frac{s^4}{s^4 + P_3 s^3 + P_2 s^2 + P_1 s + P_0}$$

Donde

$$P_0 = \omega_s^2 \times \omega_b^2$$

$$P_1 = \frac{\omega_s \omega_b^2}{Q_{TS}} + \frac{\omega_s^2 \omega_b}{Q_L}$$

$$P_2 = \frac{1+V_{AS}}{V_{AB}} \omega_s^2 + \omega_b^2 + \frac{\omega_s \omega_b}{Q_{TS} Q_L}$$

$$P_3 = \frac{\omega_s}{Q_{TS}} + \frac{\omega_b}{Q_L}$$

Y Z_E seria:

$$Z_E = R_E \left(1 + \frac{s \omega_s}{Q_{ES}} \frac{s^2 + \frac{\omega_b}{Q_L} s + \omega_b^2}{s^4 + E_3 s^3 + E_2 s^2 + E_1 s + E_0} \right)$$

Donde

$$s = j \times \omega$$

$$E_0 = \omega_s^2 \times \omega_b^2$$

$$E_1 = \frac{\omega_s \omega_b^2}{Q_{MS}} + \frac{\omega_s^2 \omega_b}{Q_L}$$

$$E_2 = \frac{1+V_{AS}}{V_{AB}} \omega_s^2 + \omega_b^2 + \frac{\omega_s \omega_b}{Q_{MS} Q_L}$$

$$E_3 = \frac{\omega_s}{Q_{MS}} + \frac{\omega_b}{Q_L}$$

Finalmente para obtener NPS a una distancia r en particular tenemos:

$$NPS(r) = 20 \log_{10} \left(\frac{2\pi \frac{S_d \rho_0 B L}{R_E M_{MS}(4\pi r)} |G(s)|}{20 \times 10^{-6}} \right)$$

1.2.3 Red de 2 puertos para un gabinete con reflector de bajos

Dentro de la búsqueda de conseguir una buena respuesta en bajas frecuencias, Arthur Berkhoff en 1994 a través de la AES publicó un estudio en donde analizó cuatro diseños de parlantes de bajas frecuencias en donde la impedancia fue el objetivo principal.

Dos de estos cuatro diseños se presentarán en esta sección.

Sistema de altavoz de doble ventilación tipo 1 Esta configuración consiste en dos cajas acústicas que comparten una cara. Cada una de estas contiene un puerto.

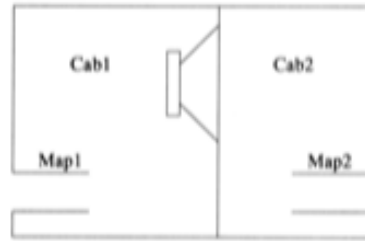


Fig. 9. Double-vented loudspeaker system type 1.

La impedancia eléctrica de esta configuración está descrita por la siguiente ecuación

$$Z(\omega) = R_e \left[1 + \frac{Q_{MS}}{Q_{ES}} \frac{j\omega^5 t_5 - j\omega^3 t_3 + j\omega t_1}{-\omega^6 t_6 + j\omega^5 t_5 + \omega^4 t_4 - j\omega^3 t_3 - \omega^2 t_2 + j\omega t_1 + 1} \right]$$

Donde:

$$t_1 = \frac{T_s}{Q_{ms}}$$

$$t_2 = T_s^2 + T_{b1}^2 (1 + \alpha_1) + T_{b2}^2 (1 + \alpha_2)$$

$$t_3 = \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b2}^2 + \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b1}^2$$

$$t_4 = T_s^2 T_{b1}^2 + T_s T_{b1}^2 + T_{b1}^2 T_{b2}^2 (1 + \alpha_1 + \alpha_2)$$

$$t_5 = \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b1}^2 T_{b2}^2$$

$$t_6 = T_s^2 T_{b1}^2 T_{b2}^2$$

El autor señala que esta expresión no contempla las fugas, por lo que no tiene una completa precisión.

Sistema de altavoz de doble ventilación tipo 2 Al igual que la configuración anterior, esta consiste en dos cajas acústicas que comparten una cara. Sin embargo, a comparación del modelo anterior aquí uno de los puertos conecta ambas cajas como se ve en la figura.

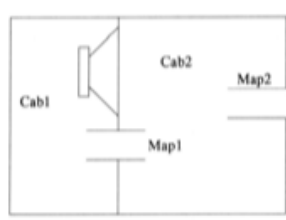


Fig. 12. Double-vented loudspeaker system type 2.

La impedancia electrica de esta configuración está descrita por la siguiente ecuación

$$Z(\omega) = R_e \left[1 + \frac{Q_{MS}}{Q_{ES}} \frac{j\omega^5 t_5 - j\omega^3 t_3 + j\omega t_1}{-\omega^6 t_6 + j\omega^5 t_5 + \omega^4 t_4 - j\omega^3 t_3 - \omega^2 t_2 + j\omega t_1 + 1} \right]$$

Donde:

$$t_1 = \frac{T_s}{Q_{ms}}$$

$$t_2 = T_s^2 + T_{b1}^2 (1 + \alpha_1) + T_{b2}^2 \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)$$

$$t_3 = \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b2}^2 \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) + \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b1}^2$$

$$t_4 = T_s^2 T_{b1}^2 + T_s T_{b1}^2 \left(1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right) + T_{b1}^2 T_{b2}^2 (1 + \alpha_1 + \alpha_2)$$

$$t_5 = \frac{T_s}{Q_{MS}} T_{b1}^2 T_{b2}^2$$

$$t_6 = T_s^2 T_{b1}^2 T_{b2}^2$$

Nuevamente hay que tener en consideración el hecho que en esta expresión no están consideradas las fugas.

2 Metodología

Para implementar las configuraciones presentadas en la sección anterior se utilizó el lenguaje Python 3.7.9 para codificar estos diversos tipos de cajas acústicas.

Dentro del código, se utilizaron las siguientes librerías:

- numpy 1.19.1
- scipy 1.5.2
- pandas 1.1.3
- matplotlib 3.3.1
- seaborn 0.11.0

También para presentar los resultados se utilizó la aplicación web Jupyter Notebook. Cada cuadernillo de esta aplicación contendrá cada modelo presentado: Caja cerrada con y sin material poroso, Caja abierta, y de modo de prototipos las redes de dos puertos de tipo 1 y tipo 2. Todos estos modelos fueron validados con ejemplos vistos en la literatura[2][3].

El concepto de prototipo es debido a que en estos dos últimos modelos no se alcanzó a implementar las pérdidas de fugas.

Todo este material quedará almacenado en un repositorio GitHub con la información necesaria para ser replicada o usada en cualquier este proyecto.

[Repositorio Github](#)

3 Paquete loudspeaker_box

En la presente sección se describirán los módulos y funciones creadas para el análisis de diseños de cajas acústicas.

Disclaimer: Este paquete trabaja con la base de datos de VituixCAD

3.1 main

Modulo principal, del cual se llama a los tres diseños y a la base de datos.

class closed_box_simple:	Descripción
<code>__init__(self,df)</code>	Inicialización de datos de altavoz.
<code>parametros_TS(self,Qtc=0.7071)</code>	Extracción de parametros de Thiele-Small.
<code>dimensiones(self,d=None)</code>	Definición de dimensiones de la caja cerrada.
<code>impedancias(self)</code>	Calculo de impedancias
<code>NPS_m(self,r=1)</code>	Estimación de Nivel de presión sonora, por defecto a 1 metro

class closed_box	Descripción
<code>__init__(self,df,phi,kappa0,theta0,alpha,lambda_ups,lambda_t)</code>	Inicialización de datos de altavoz y parametros de material porosos.
<code>parametros_TS(self,Qtc=0.7071)</code>	Extracción de parametros de Thiele-Small.
<code>dimensiones(self,d=None)</code>	Definición de dimensiones de la caja cerrada.
<code>JCAL(self)</code>	Consideración de material poroso mediante metodo JCAL.
<code>impedancias(self)</code>	Calculo de impedancias.
<code>NPS_m(self,r=1)</code>	Estimación de Nivel de presión sonora, por defecto a 1 metro.

Función	Descripción
<code>dataset(xls="Dataset_VituixCaD.xls")</code>	Lectura de base de datos.

3.2 closed_box

Modulo que contiene las herramientas necesarias para el análisis de cajas cerradas.

Impedancias	Descripción
<code>ZE(w,Re,Le,f_s,BL,RMS,QMS)</code>	Impedancia electrica a partir de parametros TS.
<code>Z_MD(w,R_ms,M_md,C_ms)</code>	Impedancia mecanica de radiación.
<code>Z_r(k0,Z0,a)</code>	Impedancia de radiación.
<code>Z_ab(Z0,k0,kc,lx,ly,lz, d,Zc=None,poro=False)</code>	Impedancia acústica de la caja.
<code>Z_e(w,Le,Re,BL,Z_MD,SD,Z_AB,Z_r)</code>	Impedancia electrica a partir de las otras impedancias.

Otros	Descripción
<code>u_hat_c(p_out6,Z_AB)</code>	Velocidad de volumen.
<code>u_hat_ref(w,eg,BL,Sd,Mms,Re)</code>	Velocidad de volumen referencial.
<code>p_hat(w,u_hat_c,Vb,r)</code>	Presion sonora en campo lejano a distancia r.
<code>Bl(Re,ws,Qes,Qms)</code>	Producto entre la densidad de flujo magnetico y la longitud del cable mediante parametros TS.
<code>a(Sd)</code>	Radio efectivo del diafragma.
<code>RMS(BL,QES,RE,QMS)</code>	Resistencia mecanica de la suspensión.
<code>MMD(MMS,a)</code>	Masa mecanica del diafragma.
<code>Vb(Vas,Qtc,Qts)</code>	Volumen de la caja.
<code>p_out(w,Sd,BL,Z_e,Z_MD,Z_ab,Z_r,r=1)</code>	Presión de salida de la caja acústica.
<code>NPS_pref(w,u_hat_ref,r=1,pref=20e-6)</code>	Nivel de presion sonora de referencia.

3.3 open_box

Modulo que contiene las herramientas necesarias para el análisis de cajas con reflectores de bajo.

Funciones	Descripción
QTS(QES,QMS)	Factor de calidad total.
S_p(a_p)	Area efectiva del puerto.
a_2(S_p)	Radio efectivo del puerto.
M_aT(S_p,t)	Masa acústica total del puerto.
C_ab(V_ab)	Compliance acústica de la caja.
w_B(M_aT,C_ab)	Frecuencia angular de resonancia de la caja.
RAL(w_b,C_ab,QL=7)	Resistencia a fugas acústicas.

class Gs	Descripción
__init__(self,w,w_s,w_b,QTS,QL,VAS,V_ab)	Inicialización de datos de altavoces.
p_0(self)	Calculo de factor P0.
p_1(self)	Calculo de factor P1.
p_2(self)	Calculo de factor P2.
p_3(self)	Calculo de factor P3.
G_s(self)	Calculo de función de respuesta en frecuencia.
mag_G_s(self)	Calculo de la magnitud de la funcion de respuesta en frecuencia.

class NPS_m	Descripción
__init__(self,BL,Sd,RE,MMS,r=1)	Inicialización de datos de altavoces.
Ps(self)	Calculo de presión sonora.
N_PS(self,mag_G)	Calculo de presión sonora a r metros.

class Z_e	Descripción
__init__(self,w,w_b,w_s,QMS,QES,QL,VAS,V_ab,RE)	Inicialización de datos de altavoces .
E_0(self)	Calculo de factor E0.
E_1(self)	Calculo de factor E1.
E_2(self)	Calculo de factor E2.
E_3(self)	Calculo de factor E3.
ZE(self)	Calculo de impedancia electrica.
mag_ZE(self)	Calculo de la magnitud de la impedancia electrica.

3.4 JCAL

Modulo que contiene las herramientas necesarias para incluir material poroso dentro de las cajas cerradas.

Función	Descripción
<code>X_Omega(w,X0,w_bar,M)</code>	Función de escalamiento.
<code>kappa_omega(w,phi,kappa0,alpha,lambda_ups)</code>	Permeabilidad dinamica viscosa.
<code>theta_omega(w,phi,theta0,lambda_t)</code>	Permeabilidad dinamica termica.
<code>C_omega</code>	Compresibilidad efectiva dinamica.
<code>Z_c(w,kappa_omega,C_omega)</code>	Impedancia caracteristica.
<code>c_w(w,kappa_omega,C_omega)</code>	Velocidad del sonido del material poroso.
<code>k_c(w,c_w)</code>	Numero de onda en el material poroso.

3.5 utils

Modulo que contiene las herramientas menores.

Función	Descripción
<code>k0(w)</code>	Numero de onda en el aire
<code>Z0()</code>	Impedancia caracteristica del aire
<code>NPS(p,pref=20e-6)</code>	Nivel de presión sonora

3.6 mediciones

Modulo que contiene las herramientas necesarias para extraer información para el calculo de parámetros de Thiele-Small.

Función	Descripción
<code>extraer_mediciones(filename)</code>	Extracción de datos de medicion de impedancia
<code>resonancia(data,mag_impedancia)</code>	Frecuencia y valor de resonancia mediante valores de impedancia
<code>bandwith(mag_impedancia,frecuency, threshold=12)</code>	Ancho de banda de la frecuencia de sampleo
<code>parametros_TS(imped_elec_mag, frecuency,f_s,f_1,f_2,Q,r_e,LE,masa)</code>	Parametros Thiele-Small mediante valores de medicion de impedancia

4 Glosario de simbolos

4.1 Terminos generales

f : Frecuencia.

ω : Frecuencia angular.

P_0 : Presión de equilibrio.

ρ_0 : Densidad del aire.

c_0 : Velocidad del sonido en aire.

k_0 : Número de onda en aire.

γ : Exponente adiabatico del aire.

\hat{e} : voltaje.

e_g : voltaje del generador.

\hat{i} : corriente.

\hat{f} : fuerza.

\hat{u} : velocidad.

\hat{p} : presión.

\hat{U} : velocidad de volumen.

4.2 Impedancias

Z_0 : Impedancia caracteristica del aire.

Z_{AB} : Impedancia acústica.

Z_{MD} : Impedancia mecánica del diafragma.

Z_r : Impedancia de radiación.

Z_c : Impedancia caracteristica del material poroso.

4.3 Parametros TS

X_{max} : Excursión máxima del cono.(movimiento no lineal)

X_{mech} : Excursión fisica máxima del cono. (movimiento lineal)

R_E : Resistencia de la bobina.

L_E : Inductancia de la bobina.

Q_{ES} : Factor de calidad eléctrico.

Bl : Producto entre la densidad de flujo magnetico y la longitud del cable enrollado de la bobina.

R_{MS} : Resistencia mecánica de la suspensión.

M_{MS} : Masa mecánica del driver.
 M_{MD} : Masa del conjunto mecánico.
 C_{MS} : Compliancia mecánica de la suspensión.
 V_{AS} : Volumen de aire equivalente a la compliancia de la suspensión.
 C_{AB} : Compliancia acústica.
 Q_{MS} : Factor de calidad mecánica.
 f_s : Frecuencia de resonancia del driver.
 ω_s : Frecuencia angular de resonancia del driver.
 R_r : Resistencia de radiación.
 X_r : Reactancia de radiación.
 a : Radio efectivo del diafragma.
 S_D : Area efectiva del diafragma.

4.4 JCAL

k_c : Número de onda del material poroso.
 C_p : Capacidad calorífica específica.
 θ_0 : Permeabilidad térmica estática.
 ω_t : Frecuencia térmica característica.
 M_t : Factor de forma térmico.
 κ_0 : Permeabilidad viscosa estática.
 ω_v : Frecuencia viscosa característica.
 M_v : Factor de forma viscoso.
 α_∞ : Tortuosidad.
 Λ_v : Largo característico viscoso.
 Λ_t : Largo característico térmico.
 ϕ : Porosidad.
 κ : Conductividad térmica.
 w_t : Frecuencia térmica característica.
 M_t : Factor de forma térmico.

4.5 Dimensiones de cajas

$l_x; l_y; l$: dimensiones de la caja.

d : Espesor del material poroso.

l_z : Espesor de la capa de aire entre el parlante y la capa de material poroso.

S_p : Area efectiva del puerto.

a_p : Radio efectivo del puerto.

4.6 Reflectores de bajo

M_{AT} : Masa acústica total del puerto.

ω_B : Frecuencia angular de resonancia.

R_{AL} : Resistencia a fugas acústicas.

$G(S)$: Función de respuesta en frecuencia.

4.7 Matrices de transferencia

C : Matriz de transferencia de la bobina.

E : Matriz de transferencia asociada a la transducción electromecánica.

D : Matriz de transferencia del diafragma.

M : Matriz de transferencia asociada a la transducción mecanoacústica.

F : Matriz de transferencia asociada a la radiación de sonido por el diafragma.

B : Matriz de transferencia de la caja.

L : Matriz de transferencia asociada a la fuga acústica.

P : Matriz de transferencia del puerto.

R : Matriz de transferencia asociada a la radiación.

A : Matriz de transferencia total.

4.8 Red de 2 puertos

T_s : Inverso multiplicativo de la frecuencia angular de resonancia del altavoz.

T_{b1} : Inverso multiplicativo de la frecuencia angular de resonancia de la primera caja acústica.

T_{b2} : Inverso multiplicativo de la frecuencia angular de resonancia de la segunda caja acústica.

α_1 : Relacion entre la compliancia del altavoz y la compliancia de la primera caja acústica.

α_2 : Relacion entre la compliancia del altavoz y la compliancia de la segunda caja acústica.

5 Referencias Bibliograficas

1. Beranek, L. L., & Mellow, T. (2012). Acoustics: sound fields and transducers. Academic Press.
2. Berkhoff, A. P. (1994). Impedance analysis of subwoofer systems. Journal of the Audio Engineering Society, 42(1/2), 4-14.
3. Venegas,R. (2020). Presentaciones del curso Cajas Acústicas, Universidad Austral de Chile.