

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**“Implementación de un software general para el diseño de  
altavoces basado en elementos pasivos discretos”**

Tesis para optar el grado de Magíster en Física aplicada

**AUTOR**

Víctor Arturo Centa Cueva

**ASESOR**

Jorge Nestor Moreno Ruiz

**JURADO**

Richard Alberto Rivera Campos

Cesar Augusto Guerra Gutierrez

DICIEMBRE, 2019

A mis padres Victor y ENMA,  
con todo mi cariño y GRATITUD por su  
INVALORABLE apoyo y haberme GUIADO  
siempre con el ejemplo.



T.A.H.M.L.R.

## Agradecimientos

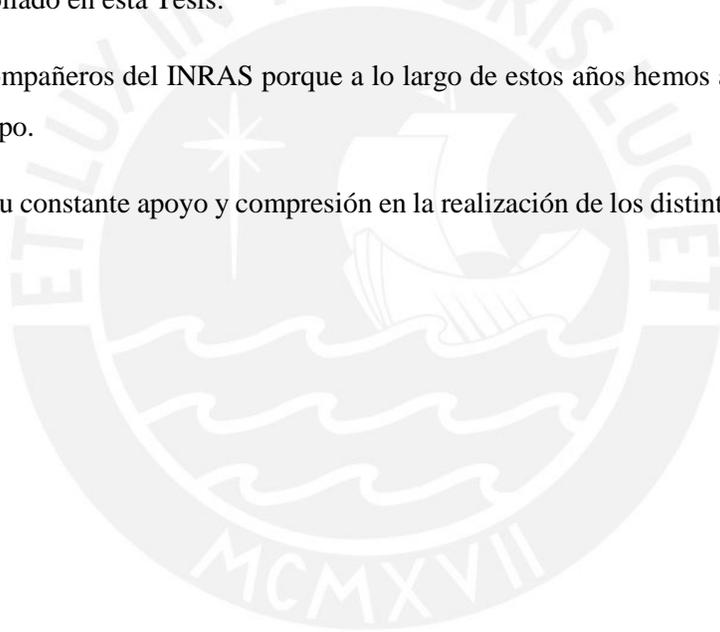
Al Dr. Jorge Moreno, mi asesor, por su orientación durante el desarrollo de esta Tesis; sin su guía esto no hubiera sido posible.

Al Dr. Jorge Heraud, por su guía, motivación, apoyo e instrucción, no solo durante la realización de mi maestría, sino también a lo largo de estos años en mis labores diarias dentro del Instituto de Radioastronomía de la PUCP (INRAS).

A mis profesores del laboratorio de acústica, principalmente al Mg. Richard Rivera y Mg. Ángelo Velarde por sus consejos y sugerencias; así mismo, extendiendo este agradecimiento a mis compañeros de los cursos de Electroacústica y Diseño de altavoces por las constantes pruebas de funcionamiento al software desarrollado en esta Tesis.

A mis amigos y compañeros del INRAS porque a lo largo de estos años hemos aprendido a trabajar como un gran equipo.

A mi familia, por su constante apoyo y comprensión en la realización de los distintos proyectos que he emprendido.



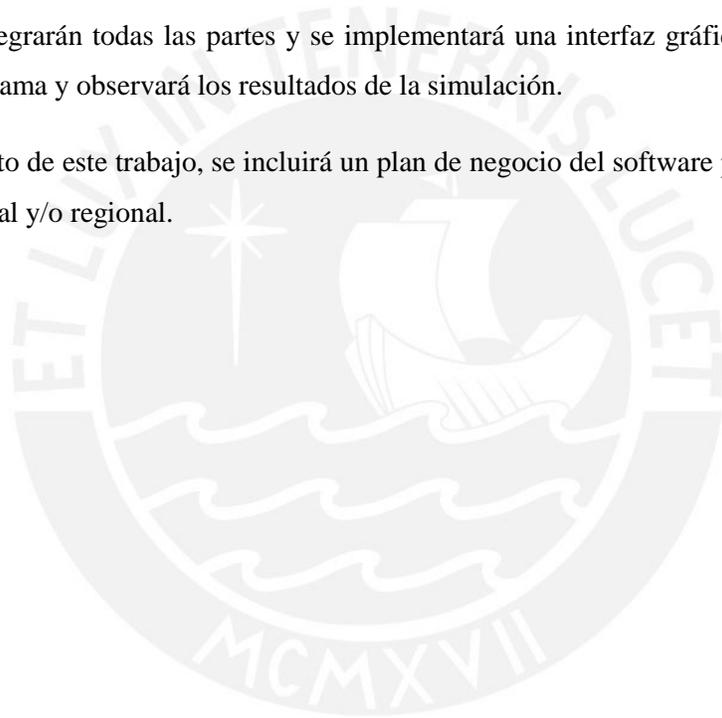
## Resumen

En esta tesis, inicialmente se estudiará el modelo lineal del altavoz electrodinámico, de los principales sistemas de altavoces y sus modelos, así mismo se trabajará con las redes de cruce y los circuitos pasivos complementarios a estas.

Una vez comprendidos los modelos, se procederá a desarrollar el software siguiendo el proceso constructivo propio del desarrollo del software y dividiéndolo en diferentes etapas iterativas con la finalidad de acompañar el proceso con resultados parciales que demuestren el correcto funcionamiento del mismo.

Finalmente, se integrarán todas las partes y se implementará una interfaz gráfica donde el usuario controlará el programa y observará los resultados de la simulación.

Como complemento de este trabajo, se incluirá un plan de negocio del software para ser aplicado en la industria nacional y/o regional.



# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	1
Objetivo general .....	1
Objetivos específicos .....	1
CAPÍTULO 1 .....	2
MODELO DEL ALTAVOZ ELECTRODINÁMICO .....	2
1.1 Modelos Electro-mecano-acústicos.....	2
1.1.1 Tipos de Analogías.....	4
1.1.2 Tipos de elementos.....	4
1.1.3 Conexiones en serie o paralelo.....	6
1.2 Partes de un altavoz electrodinámico .....	6
1.2.1 Parte eléctrica .....	7
1.2.2 Parte mecánica.....	7
1.2.3 Parte acústica.....	8
1.2.4 Acople entre las partes .....	9
1.2.5 Modelo eléctrico equivalente .....	9
1.3 Parámetros del altavoz .....	10
1.3.1 Parámetros Electro-Mecano-Acústicos .....	10
1.3.2 Parámetros Thiele-Small .....	10
1.4 Sistemas de gabinetes acústicos .....	11
1.4.1 Altavoz montado en plano infinito.....	11
1.4.2 Altavoz montado en gabinete acústico cerrado.....	12
1.4.3 Gabinete acústico con reflector de bajos.....	13
1.4.4 Gabinete acústico con Radiador pasivo.....	16
1.4.5 Gabinete acústico pasa banda de una y dos cámaras.....	18
1.4.6 Sistema isobárico.....	18
1.5 Modelo de tipo de impedancias.....	19
1.5.1 Modelo reflejado a la parte eléctrica .....	20
1.5.2 Modelo reflejado a la parte mecánica.....	20
1.5.3 Modelo reflejado a la parte acústica.....	21
1.6 Consideraciones prácticas .....	21
1.6.1 Selección de gabinete .....	21
1.6.2 Configuración de altavoces .....	22
1.6.3 Consideraciones de trabajo para el gabinete .....	25

1.7	Parámetros físicos a evaluar en la salida del altavoz .....	25
1.7.1	Impedancia (Magnitud y fase).....	25
1.7.2	Desplazamiento de la bobina.....	26
1.7.3	Nivel de presión sonora (Magnitud y fase) .....	27
1.7.4	Nivel de Potencia acústica.....	28
1.7.5	Retardo de grupo .....	28
1.7.6	Respuesta al escalón unitario.....	28
1.7.7	Eficiencia.....	29
CAPÍTULO 2 .....		30
SISTEMA DE MULTIVIAS .....		30
2.1	Clasificación de altavoces según el rango de frecuencia.....	30
2.2	Redes de cruce pasivas .....	31
2.2.1	Filtros Pasa bajo .....	31
2.2.2	Filtros pasa alto .....	32
2.2.3	Filtros pasa banda.....	33
2.2.4	Filtros Rechaza banda .....	33
2.2.5	Red Zobel compensadora de efecto inductivo.....	33
2.2.6	Circuito anti-resonante .....	34
2.2.7	Circuito tanque con Q variable.....	34
2.2.8	Red zobel correctora de fase .....	35
2.2.9	Atenuador L-Pad .....	36
CAPÍTULO 3 .....		37
PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE .....		37
3.1	Etapas en el proceso de construcción de software.....	37
3.2	Requisitos .....	38
3.2.1	Objetivo del software .....	38
3.2.2	Requisitos del entorno.....	38
3.2.3	Requisitos generales del software .....	38
3.2.4	Requisitos en el sistema altavoz-gabinete .....	39
3.2.5	Requisitos de los circuitos de redes de cruce y compensación.....	40
3.3	Análisis y Diseño del sistema.....	40
3.3.1	Diseño de clases .....	41
3.3.2	Diseño de formularios .....	48
3.4	Programación .....	54
3.4.1	Diagrama de flujo principal.....	54

3.4.2	Diagrama de flujo del conjunto Altavoz-Gabinete.....	55
3.4.3	Diagrama de flujo del circuito pasivo.....	56
3.4.4	Diagrama resultado de via.....	57
3.4.5	Diagrama resultado general.....	58
3.4.6	Lenguaje de programación.....	58
CAPÍTULO 4.....		59
PRESENTACIÓN DEL SOFTWARE Y SUS RESULTADOS.....		59
3.5	Presentación del software.....	59
3.5.1	Ventana de navegación.....	59
3.5.2	Ingreso de parámetros Altavoz-Gabinete.....	60
3.5.3	Ingreso de parámetros de las redes de cruce.....	61
3.5.4	Ventana gráfico.....	62
3.5.5	Barras de herramientas.....	63
3.6	Uso del software para el análisis del comportamiento de las variables.....	66
3.6.1	Variación del factor de fuerza (BL).....	67
3.6.2	Variación de la masa mecánica.....	68
3.6.3	Variación de la frecuencia de resonancia del altavoz.....	69
3.6.4	Variación del Volumen del gabinete acústico cerrado.....	70
3.6.5	Variación de la resistencia material absorbente en gabinete acústico cerrado.....	71
3.6.6	Variación de la Frecuencia de resonancia del ducto en un gabinete acústico con reflector de bajos.....	72
3.6.7	Variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje convencional.....	73
3.6.8	Variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje isobárico.....	74
3.7	Uso del software para diseñar la red de cruce pasiva en un altavoz de bajas frecuencias.....	75
3.7.1	Altavoz montado en plano infinito.....	75
3.7.2	Corrección de impedancia de carga.....	77
3.7.3	Función de transferencia del filtro.....	79
3.7.4	Pérdidas por inserción en bobina.....	81
3.8	PLAN DE NEGOCIO.....	83
CONCLUSIONES.....		84
RECOMENDACIONES.....		85
BIBLIOGRAFÍA.....		86

# INTRODUCCIÓN

La industria de altavoces ha evolucionado mucho en las últimas décadas, hoy en día el mercado exige una calidad superior en la reproducción del sonido; para ello se requieren mejores modelos en el proceso de diseño de los mismos. Es por ello que se hace indispensable la utilización de herramientas de software que contribuyan a la optimización del proceso de diseño.

En esta tesis se desarrollará, un modelo lineal completo que permite simular el altavoz como transductor en el rango de pistón rígido, sistemas de altavoces, filtros, y los circuitos correctores que se requieran en el proceso.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Diseñar e implementar un software de diseño de altavoces para profesionales.

### Objetivos específicos

- Analizar los requerimientos de un correcto diseño y desarrollar el mejor modelo posible para obtener un sistema de altavoces de alta calidad.
- Desarrollar un software, que dentro de sus limitaciones (modelo lineal y discreto) sea de la máxima utilidad posible, escalable y que permita optimizar el objeto de diseño en el tiempo más corto posible.
- Realizar un software de utilidad para docentes y estudiantes, para el caso de estos últimos debe permitirle comprender la operación de los sistemas en estudio, así como el orden de magnitud de los parámetros que están en juego.

# CAPÍTULO 1

## MODELO DEL ALTAVOZ ELECTRODINÁMICO

En este capítulo se presenta el modelo electro-mecano-acústico del altavoz electrodinámico y de los principales tipos de gabinetes acústicos empleados hoy en día, para lo cual se describen las analogías electro-mecano-acústicas utilizadas y algunas consideraciones prácticas en la construcción del modelo equivalente del altavoz montado en un gabinete acústico.

Por último, se describen los principales parámetros físicos que el diseñador evalúa en la respuesta del altavoz.

### 1.1 Modelos Electro-mecano-acústicos

Para entender el comportamiento de un circuito eléctrico se analiza la relación entre los valores de tensión y corriente de sus elementos; esta interacción es representada por medio de ecuaciones diferenciales que modelan matemáticamente el sistema. Se hace necesario resolver estas ecuaciones cuando se quiere describir el comportamiento transitorio del sistema; utilizándose las leyes de Kirchhoff que permiten estudiar el estado estacionario.

Dado que los sistemas eléctricos, mecánicos y acústicos presentan ecuaciones diferenciales análogas, es posible utilizar la teoría de circuitos eléctricos para observar el comportamiento de los sistemas mecánicos y acústicos analizando un circuito eléctrico equivalente. (Beranek & Mellow, 2012)

En la Tabla 1.1 se observa el diagrama esquemático de los componentes eléctricos y las expresiones matemáticas asociadas en tiempo y frecuencia, de cada uno. Se debe resaltar que se tiene 5 tipos de elementos (Resistencia, inductancia, capacitancia, transformador y girador) y hay tres cantidades genéricas: (a) la caída a través del circuito; (b) el flujo a través de un elemento del circuito y (c) la magnitud del tipo de elemento del circuito. Las magnitudes (a) y (b) de la Tabla 1.1 no corresponden necesariamente a los valores de tensión y corriente respectivamente; (a) podría representar un valor de fuerza, velocidad, presión o caudal, en tal caso (b) representaría valores de velocidad, fuerza, caudal (velocidad de volumen) o presión respectivamente.

Símbolo	Nombre	Transitorio	Estacionario
	Generador de caída constante	La caída es independiente de lo que está conectado al generador. Su impedancia interna es cero, de modo que si se apaga uno de cualquier número de generadores en un circuito, se sustituye por un cortocircuito. El signo indica el terminal positivo y negativo del generador.	
	Generador de flujo constante	El flujo es independiente de lo que está conectado al generador. Su impedancia interna es infinita, de modo que si se apaga uno de los generadores de un circuito, se reemplaza por un circuito abierto. Las flechas apuntan en la dirección del flujo positivo.	
	Elemento tipo Resistencia	$a = bc$	$\tilde{a} = \tilde{b}c$
	Elemento tipo Capacitancia	$a = \frac{1}{c} \int b dt$	$\tilde{a} = \frac{\tilde{b}}{j\omega c}$
	Elemento tipo Inductancia	$a = c \frac{db}{dt}$	$\tilde{a} = j\omega c \tilde{b}$
	Elemento tipo Transformador	$a = cg$ $b = \frac{d}{c}$ $\frac{a}{b} = c^2 \frac{g}{d}$	$\tilde{a} = c\tilde{g}$ $\tilde{b} = \frac{\tilde{d}}{c}$ $\frac{\tilde{a}}{\tilde{b}} = c^2 \frac{\tilde{g}}{\tilde{d}}$
	Elemento tipo Girador	$c_1 a = d$ $b = c_2 g$ $\frac{a}{b} = \frac{1}{c_1 c_2} \frac{g}{d}$	$c_1 \tilde{a} = \tilde{d}$ $\tilde{b} = c_2 \tilde{g}$ $\frac{\tilde{a}}{\tilde{b}} = \frac{1}{c_1 c_2} \frac{\tilde{g}}{\tilde{d}}$

Tabla 1.1: Diagrama esquemático de circuito eléctricos y el modelo matemático asociado (editado de (Beranek & Mellow, 2012)).

### 1.1.1 Tipos de Analogías

Se definen dos tipos: analogía de impedancia y analogía de movilidad (admitancia); las cuales nos indican la dificultad (tipo impedancia) o facilidad (tipo movilidad) del movimiento en relación a una fuerza, presión o tensión aplicada al sistema que se desea modelar.

Para el modelo mecánico, cuando la tensión es reemplazada por la fuerza y la corriente por la velocidad es una analogía tipo impedancia, y cuando la tensión es reemplazada por la velocidad y la corriente por la fuerza es una analogía tipo movilidad.

Para el modelo acústico, cuando la variable de tensión es reemplazada por la presión y la corriente por el caudal es una analogía tipo impedancia, y cuando la variable tensión es reemplazada por el caudal y la corriente por la presión es una analogía tipo movilidad.

En la práctica se suele utilizar las analogías tipo impedancia porque es común hablar de caídas de tensión como de caídas de presión y de flujo de corriente (movimiento) como de velocidad o caudal (velocidad de volumen); pero esto queda a criterio del diseñador según el problema que se desee resolver.

### 1.1.2 Tipos de elementos

Los tipos de elementos en el circuito eléctrico asociados a los modelos según el dominio mecánico o acústico son:

- Tipo resistencia eléctrica, asociado a la resistencia mecánica o resistencia acústica según sea el caso.
- Tipo inductancia asociado a la masa mecánica o masa acústica según sea el caso.
- Tipo capacitancia asociado a la compliancia mecánica o compliancia acústica según sea caso.
- Transformador eléctrico, es utilizado para convertir impedancias que están dentro de un dominio conectado a otro y viceversa (eléctrico, mecánico o acústico).
- Girador eléctrico, presenta un comportamiento similar al transformador pero refleja la admitancia.

Para obtener los valores de impedancia mecánica se dividen los valores de fuerza ( $f$ ) entre velocidad ( $u$ ) y para la impedancia acústica dividir presión ( $p$ ) entre caudal ( $q$ ).

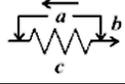
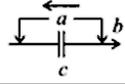
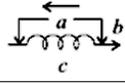
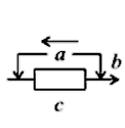
Elemento	Eléctrica	Mecánica		Acústica	
		Analogía admitancia	Analogía impedancia	Analogía admitancia	Analogía impedancia
a	e	u	f	P	U
b	i	f	u	U	P
	$c = R_E$	$c = \frac{1}{R_M} = Y_M$	$c = R_M$	$c = R_A$	$c = \frac{1}{R_A} = Y_A$
	$c = C_E$	$c = M_M$	$c = C_M$	$c = C_A$	$c = M_A$
	$c = L_E$	$c = C_M$	$c = M_M$	$c = M_A$	$c = C_A$
	$c = Z_E = \frac{e}{i}$	$c = Y_M = \frac{u}{f}$ $= \frac{1}{Z_M}$	$c = Z_M = \frac{f}{u}$ $= \frac{1}{Y_M}$	$c = Z_A = \frac{P}{U}$ $= \frac{1}{Y_A}$	$c = Y_A = \frac{U}{P}$ $= \frac{1}{Z_A}$

Tabla 1.2: Valores para a,b y c en circuito eléctrico, mecánico y acústico. (Editado de (Beranek & Mellow, 2012) )

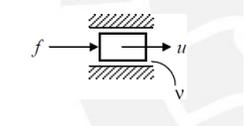
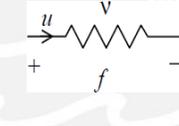
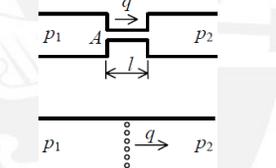
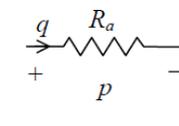
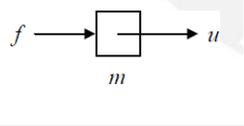
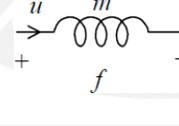
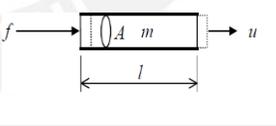
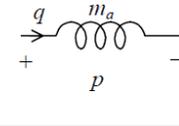
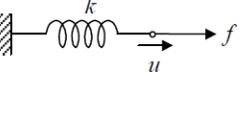
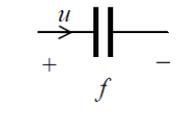
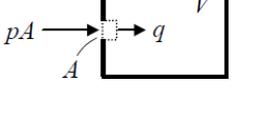
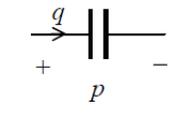
	Mecánico		Acústico	
<b>Resistivo</b>				
	Pérdidas por fricción		Pérdidas por fricción en ductos o material poroso	
<b>Inductivo</b>				
	Movimiento de masa mecánica		Movimiento de masa acústica en ductos	
<b>Capacitivo</b>				
	Movimiento de resorte (compliance = 1/k)		Compresión de volumen de aire (compliance acústica)	

Tabla 1.3: Símbolos de elementos eléctricos y su analogía mecánica y acústica correspondiente (Editado de (Beranek & Mellow, 2012) ).

### 1.1.3 Conexiones en serie o paralelo

Según la interacción entre dos elementos pueden conectarse en serie o paralelo, tal como se hace en los circuitos eléctricos.

Según el medio de trabajo se debe considerar lo siguiente:

- Si el medio es mecánico, se colocan dos elementos en paralelo cuando la fuerza de transmisión es la misma y en serie cuando se mueven a la misma velocidad.
- Si el medio es acústico, se colocan dos elementos en paralelo cuando comparten la misma presión entre sus extremos y en serie cuando circula el mismo caudal entre ellos.

## 1.2 Partes de un altavoz electrodinámico

Observando los diferentes elementos que conforman el altavoz electrodinámico (Figura 1.1) y las Tabla 1.1, Tabla 1.2 y Tabla 1.3 es posible deducir su modelo Electro-mecano-acústico (EMA).

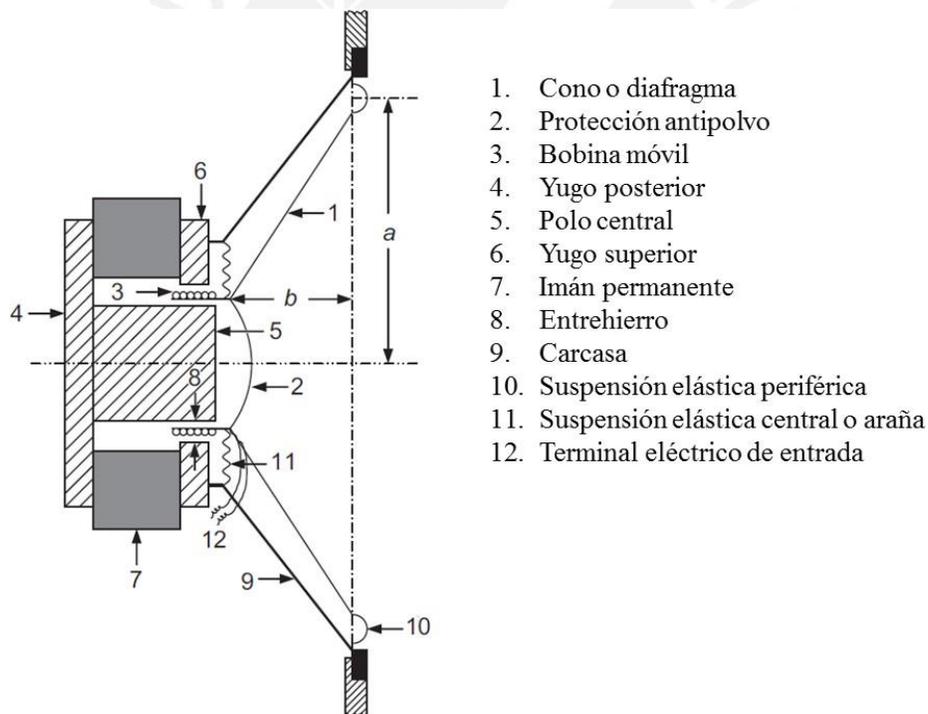


Figura 1.1. Corte transversal de un altavoz de bobina móvil típico, indicando las partes funcionalmente más importantes. (Beranek & Mellow, 2012)

Para comprender este modelo, se va a dividir el altavoz en parte eléctrica, mecánica y acústica; y se definirá el tipo de componente utilizado para conectar estas partes en el circuito eléctrico equivalente.

### 1.2.1 Parte eléctrica

La parte eléctrica está conformada por una bobina móvil inmersa en un campo magnético radial; este campo es producido en el entrehierro del circuito magnético del altavoz. En la Figura 1.2 se observa que la bobina está ubicada alrededor del polo central.

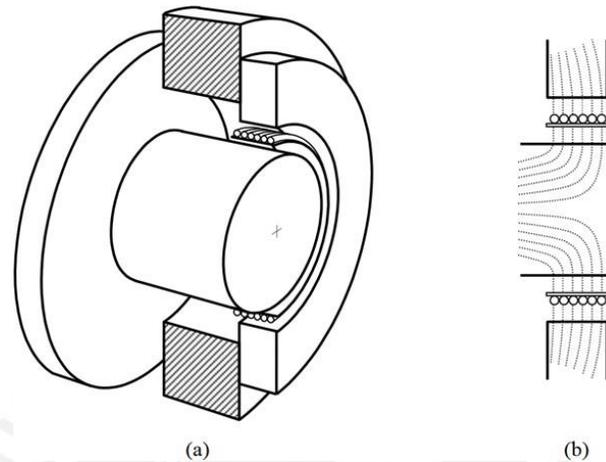


Figura 1.2. (a) Detalle de la unidad motriz del altavoz electrodinámico. El imán permanente, el yugo posterior y la bobina móvil se han seccionado. (b) Líneas de campo magnético en el entrehierro. (Miyara)

Al operar el altavoz, el cono es excitado por una fuerza ( $Bli$ ) como resultado de la interacción entre la corriente ( $i$ ) que circula por la bobina y la densidad de flujo ( $B$ ) producida por el imán permanente en el entrehierro. Adicionalmente a la densidad de flujo que genera la fuerza anteriormente mencionada, existirá una densidad de flujo ( $B'(\omega)$ ) causada por la bobina que tratará de inducir corrientes parásitas en el polo.

De lo anterior, se puede inferir que el circuito equivalente de esta parte lo conforma una resistencia eléctrica ( $R_E$ ) en serie a una inductancia ( $L_E$ ) y se coloca una resistencia ( $R_{EH}$ ) en paralelo a  $L_E$  que representa las corrientes parásitas descritas en el párrafo anterior.

### 1.2.2 Parte mecánica

En esta parte están todos los elementos mecánicos involucrados en el movimiento. El circuito equivalente lo conforma una compliancia mecánica ( $C_{MS}$ ) correspondiente a la suspensión elástica periférica y central (araña), una masa mecánica ( $M_{MD}$ ) correspondiente a la suma de todas las masas mecánicas involucradas en el movimiento (principalmente la masa del diafragma y la bobina) y debido a que existen pérdidas mecánicas, principalmente en la suspensión, se introduce una resistencia ( $R_{MS}$ ). Como todo el sistema se mueve a la misma velocidad se consideran los elementos en serie.

### 1.2.3 Parte acústica

Consiste principalmente en una impedancia de radiación sonora ( $Z_{AR}$ ) como resultado de la interacción del movimiento del diafragma con el medio. Como el diafragma irradia en dos direcciones (frontal y posterior) la impedancia se modela tanto en la parte frontal como posterior del altavoz. El flujo de volumen de aire frontal (o caudal) está desfasado  $180^\circ$  del flujo de volumen de aire posterior.

Puesto que el software que se desarrolla en esta tesis se limita al rango frecuencias en donde el altavoz actúa como pistón rígido y dado que este comportamiento sólo se presenta hasta una frecuencia ( $f$ ) determinada por  $ka \leq 1$  (donde  $k = \frac{2\pi f}{c}$ ,  $a$  es el radio del diafragma y  $c$  es la velocidad del sonido en el medio), únicamente se modelará hasta esta condición.

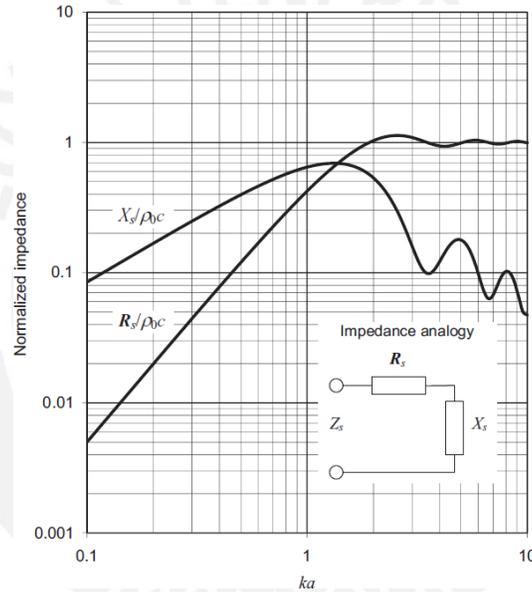


Figura 1.3. Parte real e imaginaria de la impedancia de radiación específica normalizada ( $Z_s / \rho_0 C$ ) de carga de aire sobre un lado de pistón rígido circular de radio  $a$  montado en plano infinito.

En la Figura 1.3 se muestra la impedancia de radiación acústica específica normalizada para un pistón rígido montado en plano infinito en donde los dos segmentos de recta describen el comportamiento de la parte real e imaginaria de la impedancia de radiación. Estos valores, que si bien es cierto se representan como una función compleja descrita por funciones de Bessel; pueden modelarse en forma simplificada para la condición de  $ka \leq 1$ , como una resistencia de radiación acústica ( $R_A$ ) en paralelo a una masa de radiación acústica ( $M_A$ ) como se observa en la Figura 1.4 dónde:

$$M_A = \frac{8\rho_0}{3a \cdot \pi^2} \quad (1.1)$$

$$R_A = \frac{\rho_0 c}{\pi a^2} \quad (1.2)$$

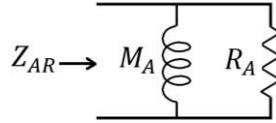


Figura 1.4: Impedancia acústica de radiación de un pistón rígido montado en pantalla infinita para valores de  $ka \leq 1$ , donde  $a$  es el radio del pistón.

También se incluye en esta parte cualquier elemento acústico adicional acoplado a una de las impedancias de radiación frontal o posterior (como por ejemplo gabinetes acústicas, ductos, materiales absorbentes, etc.).

### 1.2.4 Acople entre las partes

Para acoplar la parte eléctrica con la parte mecánica se agrega un elemento de tipo girador, relacionado al factor de fuerza ( $Bl: 1$ ); y para acoplar la parte mecánica con la acústica se agrega un elemento de tipo transformador relacionado al área del diafragma ( $S_D: 1$ ).

El generador eléctrico conectado en el lado eléctrico del altavoz ( $e_g$ ) tiene una pequeña resistencia interna ( $R_g$ ) conectada en serie a  $R_E$ , pero se considera despreciable para nuestros cálculos.

También se puede considerar reemplazar  $R_{EH}$ , por una resistencia en serie que varíe con la frecuencia ( $R(\omega)$ ).

### 1.2.5 Modelo eléctrico equivalente

Una vez evaluadas las partes del modelo y la conexión entre las mismas, se construye el circuito eléctrico equivalente del altavoz, el cual se muestra en la Figura 1.5.

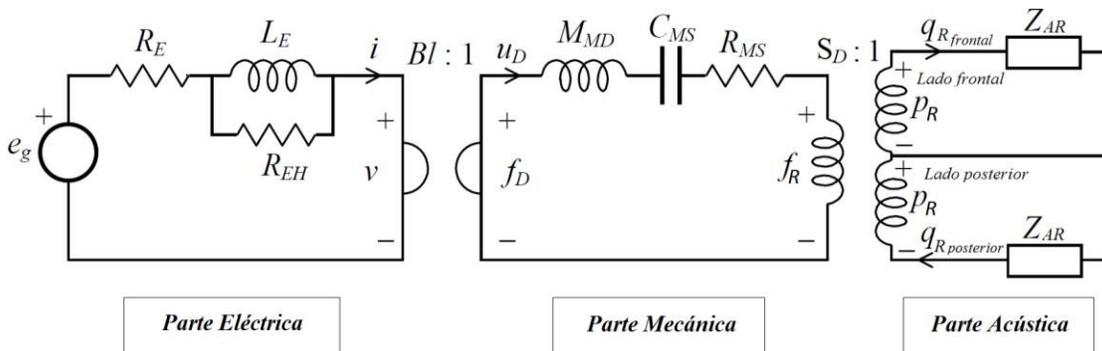


Figura 1.5: Modelo eléctrico equivalente del altavoz.

## 1.3 Parámetros del altavoz

### 1.3.1 Parámetros Electro-Mecano-Acústicos

Son los parámetros directamente asociados al modelo EMA. Es común dar como parámetro la frecuencia de resonancia del altavoz ( $f_s$ ) en lugar de la compliancia mecánica, la misma que se haya de la siguiente manera:

$$C_{MS} = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 (M_{MS})} \quad (1.3)$$

$$M_{MS} = M_{MD} + M_{MA} \quad (1.4)$$

$$M_{MA} = M_A \cdot S_D^2 \quad (1.5)$$

Donde  $M_{MD}$  es la masa mecánica,  $M_{MA}$  es la masa de radiación acústica ( $M_A$ ) reflejada al lado mecánico y  $S_D$  es el área de radiación efectiva del altavoz.

### 1.3.2 Parámetros Thiele-Small

Son parámetros introducidos por Neville Thiele y Richard Small en 1971, que analizan al altavoz como un filtro paso-alto, en donde se indica la frecuencia de resonancia del altavoz y los factores de calidad asociados a las pérdidas en las diferentes partes del sistema. Estos parámetros son:

- Frecuencia de resonancia del sistema móvil del altavoz ( $f_s$ ), es la frecuencia a la cual el altavoz se mueve con mínimo esfuerzo y es a partir de esta que el altavoz puede irradiar óptimamente.

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_{MS} \cdot M_{MS}}} \quad (1.6)$$

- Factor de calidad eléctrico ( $Q_{ES}$ ), asociado a las pérdidas por la resistencia eléctrica del altavoz. Cuanto menor es, menores son las pérdidas en la bobina.

$$Q_{ES} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{MS} \cdot R_e}{(Bl)^2} \quad (1.7)$$

- Factor de calidad mecánico ( $Q_{MS}$ ), asociado a las pérdidas mecánicas y acústicas. Cuanto mayor es, menores son las pérdidas por las partes mecánicas del altavoz.

$$Q_{MS} = \frac{2\pi \cdot f_s \cdot M_{MS}}{R_{MS}} \quad (1.8)$$

- Factor de calidad del sistema ( $Q_{TS}$ ), asociado a todas las pérdidas (eléctricas, mecánicas y acústicas). Cuanto menor es, menores son las pérdidas en el altavoz.

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} \quad (1.9)$$

- Volumen de aire equivalente que tiene la misma compliancia que la compliancia mecánica del altavoz ( $V_{AS}$ ).

$$V_{AS} = \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_{dt}^2 \cdot C_{MS} \quad (1.10)$$

## 1.4 Sistemas de gabinetes acústicos

Observando las analogías EMA, se presentan los sistemas de altavoces montados en los diferentes tipos de gabinetes acústicos.

### 1.4.1 Altavoz montado en plano infinito

Es el altavoz montado en un plano muy grande en comparación con el área del diafragma, se utiliza para separar las radiaciones frontal y posterior de altavoz de modo que no exista interferencia destructiva entre estas; con ello se logra que el altavoz pueda dar una respuesta plana por encima de la primera frecuencia de resonancia (Beranek L. L., 1961). Es el más habitual para realizar las mediciones y obtener sus parámetros.

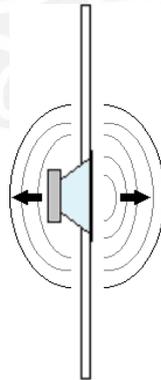


Figura 1.6: Altavoz montado en plano infinito.

En este sistema el modelo eléctrico del sistema EMA es similar al que se ha observado en la Figura 1.5, en donde la radiación a evaluar es la que se encuentra al frente del altavoz.

### 1.4.2 Altavoz montado en gabinete acústico cerrado

Dada la importancia de separar la radiación frontal de la posterior, el altavoz es montado dentro de un gabinete cerrado con material absorbente, tal y como se observa en la Figura 1.7; lo que le agrega una impedancia acústica a la parte posterior. Esto trae la desventaja de incrementar la frecuencia de resonancia del conjunto gabinete-altavoz (por lo que se perderán sonidos graves), y aprovechar solamente la potencia de radiación frontal; sin embargo, mejora su respuesta en el dominio temporal. (Beranek & Mellow, 2012)

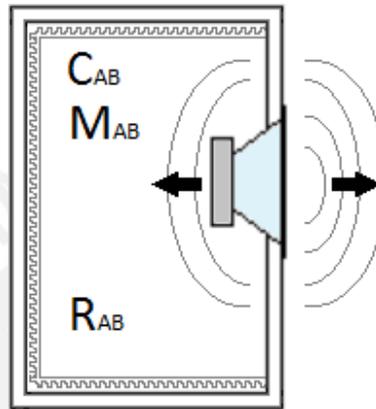


Figura 1.7: Altavoz montado en gabinete cerrado.

El circuito equivalente de este sistema se diferencia al de la Figura 1.5 en que a la impedancia de radiación acústica posterior se conecta una compliancia acústica ( $C_{AB}$ ) debido al volumen ( $V_{AB}$ ) del gabinete y una resistencia acústica ( $R_{AB}$ ) debido al material absorbente.

Además, en el modelo se debe considerar la masa de aire que acopla la parte posterior del altavoz con el volumen del gabinete, por lo que la masa de radiación acústica ( $M_A$ ) de la Figura 1.4 es reemplazada por una masa de radiación acústica ( $M_{AB}$ ), la cual, toma en cuenta la relación ( $B$ ) existente entre el área efectiva del altavoz y el área de la cara del gabinete que lo contiene; tal y como se muestra en la Figura 1.8.

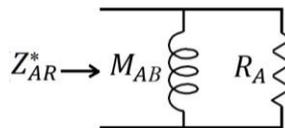


Figura 1.8. Impedancia de radiación acústica del altavoz considerando el volumen del gabinete

Donde:

$$M_{AB} = \frac{B \cdot \rho_0}{\pi \cdot a} \quad (1.11)$$

En la Figura 1.9 se muestra el circuito equivalente de la parte acústica del altavoz montado en gabinete acústico cerrado.

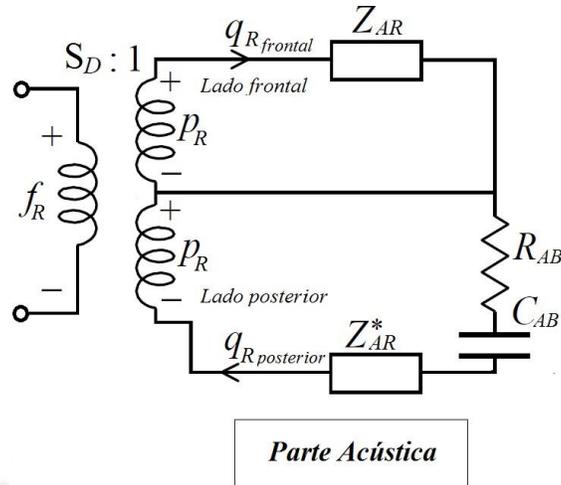


Figura 1.9: Circuito eléctrico equivalente de la parte acústica del altavoz montado en gabinete acústico cerrado.

Donde:

$$C_{AB} = \frac{V_{AB}}{\rho_0 \cdot c^2} \quad (1.12)$$

### 1.4.3 Gabinete acústico con reflector de bajos

En el sistema reflector de bajos (el cual es mostrado en la Figura 1.10), la radiación posterior del altavoz excita un resonador conformado por el volumen del gabinete y un ducto instalado en una de sus paredes, normalmente la frontal. La frecuencia de resonancia del resonador se selecciona, habitualmente, a una frecuencia igual o menor de la frecuencia de resonancia del altavoz al aire, que es aproximadamente la frecuencia a partir de la cual el altavoz empieza a irradiar pobremente, pese a que a esas frecuencias se desplaza con gran amplitud, esto se da debido a la característica reactiva de la impedancia de radiación a esa frecuencia.

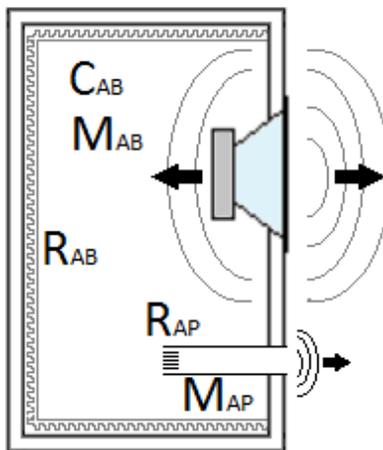


Figura 1.10: Altavoz montado en gabinete con reflector de bajos.

Cuando el resonador se activa, consume la energía del altavoz de un modo tal que éste prácticamente se detiene a dicha frecuencia. En esta condición se genera un frente de velocidad de partícula en la boca del ducto; el cual irradia sonido de baja frecuencia, lo que complementa la respuesta de baja frecuencia del altavoz, tal y como se muestra en la Figura 1.11.

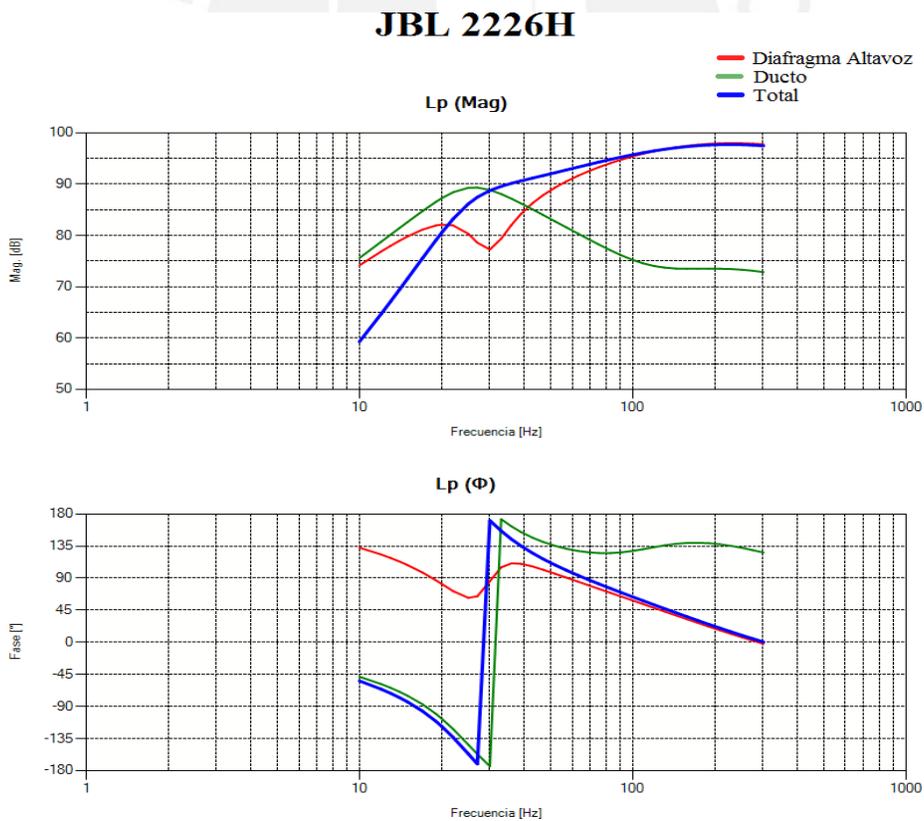


Figura 1.11. Nivel de presión sonora del altavoz JBL 2226H montado en Gabinete reflector de bajo.

En este tipo de sistema se debe considerar que:

- Si el ducto no se dimensiona adecuadamente pueden presentarse problemas de turbulencia; para ello, en la práctica, en el cálculo del área transversal mínima se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$S_p \geq 0.8 \cdot f_p \cdot V_{AB} \quad (1.13)$$

Donde  $S_p$  es el área transversal del ducto,  $f_p$  la frecuencia de resonancia del ducto y  $V_{AB}$  el volumen del gabinete. (Beyma, 2018)

- El problema del reflector de bajos es que al aumentar las bajas frecuencias se corre el riesgo de dañar el altavoz si se excede el límite de máxima excursión de la bobina debido su gran desplazamiento en esa zona del espectro.

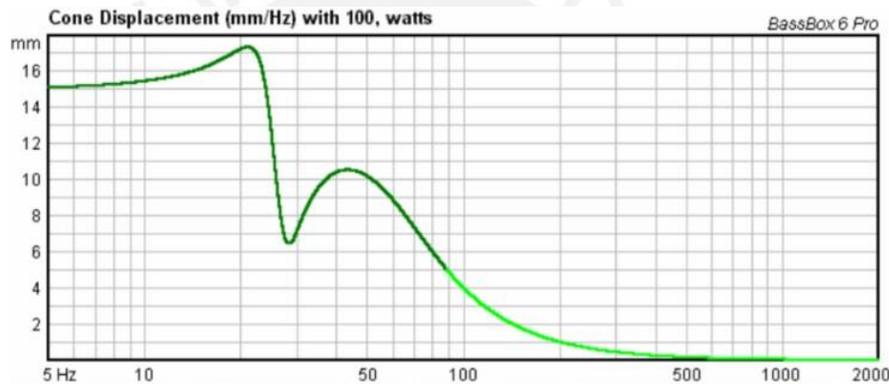


Figura 1.12: Desplazamiento del cono del altavoz 8''BX (Beyma), montado en un gabinete reflector de bajos, con 115 litros de volumen (aplicando 100W). (Beyma, 2018)

- La respuesta temporal del conjunto se verá afectada, debido a que la señal tardará más en alcanzar el estado estacionario.

El circuito equivalente de este sistema se inicia con el modelo del gabinete cerrado, al cual se le adiciona una resistencia acústica ( $R_{AP}$ ) en serie a una masa acústica ( $M_{AP}$ ) debido al ducto y una impedancia de radiación acústica ( $Z_{ARP}$ ) debido al aire que circunda el ducto, tal como se observa en la Figura 1.13.

Para calcular la masa acústica del ducto se toma en cuenta su radio ( $a_r$ ), longitud ( $l$ ) y un factor de corrección según las condiciones de fronteras alrededor de la boca del ducto (esta corrección corresponde al efecto reactivo de la carga de aire en bajas frecuencias); además, es importante considerar la cantidad ( $N$ ) de ductos. Es común suponer como dato de entrada la frecuencia ( $f_p$ ) a la

que se desea sintonizar el ducto con el volumen del gabinete y a partir de allí calcular el valor de la masa acústica y la longitud real del ducto. (Beranek & Mellow, 2012)

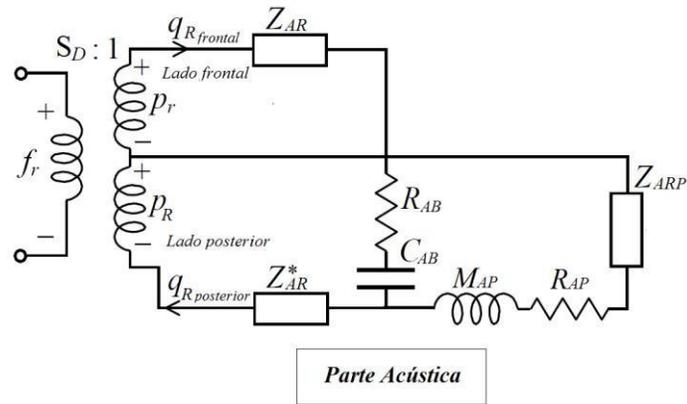


Figura 1.13: Circuito eléctrico equivalente de la parte acústica del altavoz montado en gabinete con reflector de bajos.

Donde:

$$M_{AP} = \frac{\rho_0 \cdot l'}{N \cdot \pi a_p^2} \quad (1.14)$$

$$M_{AP} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C_{AB}} \quad (1.15)$$

$$l' = l + \text{factor} \cdot a_p \quad (1.16)$$

#### 1.4.4 Gabinete acústico con Radiador pasivo

Este sistema es similar al reflector de bajos, pero se sustituye el ducto por un radiador pasivo que es similar a un altavoz, pero sin la unidad motora. Tiene la ventaja de que no hay posibilidad de que se generen turbulencias como, puede ocurrir, en un ducto.

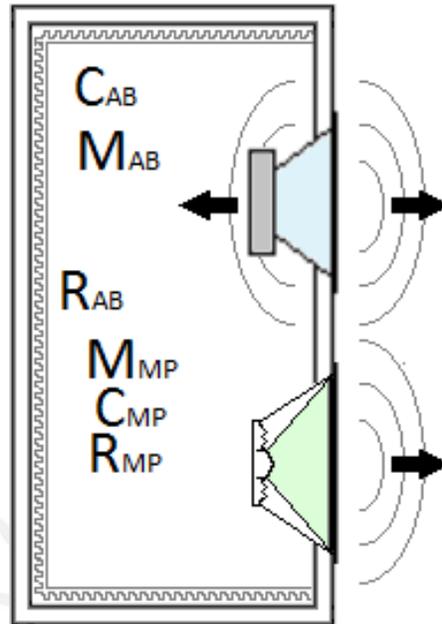


Figura 1.14: Altavoz montado en gabinete con Radiador pasivo.

Como el sistema resonante, en este caso, lo conforma un sistema masa–resorte–amortiguador y el aire del gabinete; el modelo equivalente se obtiene a partir del modelo gabinete cerrado, al cual se le adiciona una resistencia mecánica ( $R_{MP}$ ), una masa mecánica ( $M_{MP}$ ), una compliancia mecánica ( $C_{MP}$ ) y una impedancia de radiación acústica ( $Z_{ARP}$ ) debido al aire que rodea al radiador pasivo de área  $S_{D2}$ , tal y como se observa en la Figura 1.15.

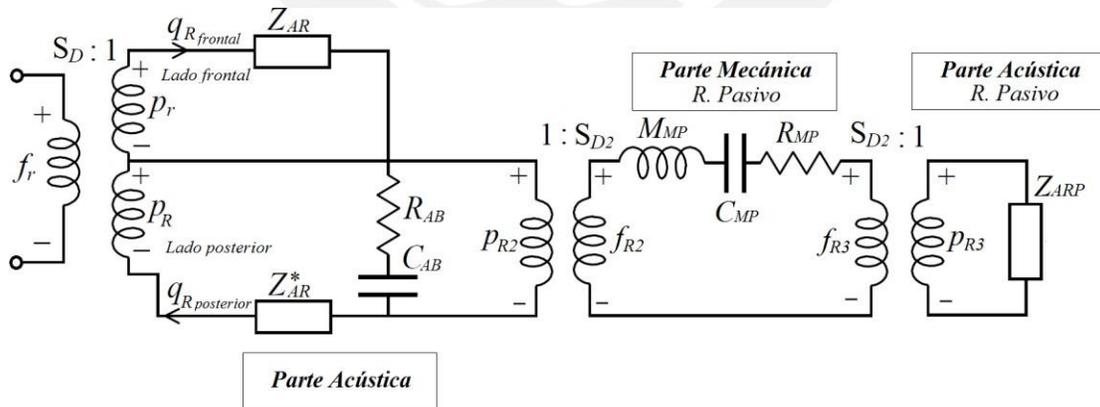


Figura 1.15: Circuito eléctrico equivalente de la parte acústica del altavoz montado en gabinete con Radiador pasivo.

### 1.4.5 Gabinete acústico pasa banda de una y dos cámaras

Estos sistemas están conformados por un gabinete subdividido por una partición interna, el cual define, normalmente, dos volúmenes distintos; en el caso del gabinete acústico pasa banda de una cámara (Figura 1.16.a) uno de los volúmenes permanece sellado mientras que el otro se sintoniza con un ducto, de modo tal que la radiación frontal del altavoz queda restringida a una banda. Este sistema presenta una buena respuesta en el dominio del tiempo debido al control que ejerce, sobre el cono del altavoz, el volumen confinado en el compartimiento sellado.

El sistema dos cámaras (Figura 1.16.b) es similar al anterior, con la variante que el volumen, que en el caso anterior era sellado, ahora se sintoniza a otra frecuencia; el resultado final es la radiación de dos bandas que se sumarán dando un ancho de banda mayor. La respuesta impulsiva de este sistema no es tan buena como la anterior.

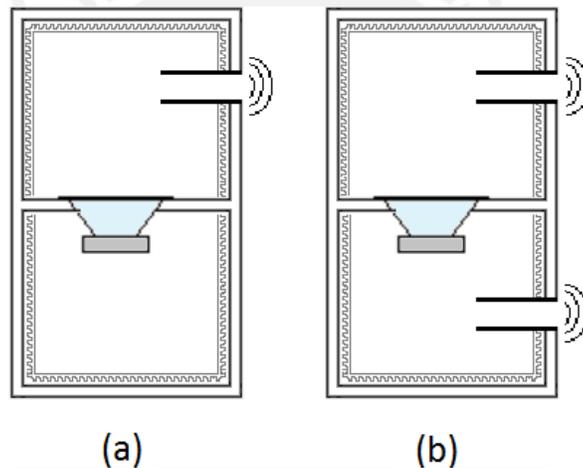


Figura 1.16: (a) Gabinete acústico pasa banda de una cámara. (b) Gabinete acústico pasa banda de dos cámaras.

Para elaborar el circuito acústico equivalente de la Figura 1.16, se considera una carga acústica similar a la de un gabinete reflector de bajos conectado a la radiación frontal y la de un gabinete cerrado o gabinete reflector de bajos conectado a la radiación posterior, para el caso de gabinete pasa-banda una o dos cámaras respectivamente.

### 1.4.6 Sistema isobárico

Consiste en colocar dos altavoces idénticos enfrentados dentro de un mismo gabinete, suministrando la tensión eléctrica adecuada para que los diafragmas se muevan a la misma dirección. Considerando que el movimiento de los diafragmas y las impedancias de carga acústica son los mismos, la presión media dentro del volumen formado por los diafragmas es constante, creando una región isobárica. (Pueo Ortega & Romá Romero, 2003)

En la Figura 1.17 se observa un sistema isobárico en donde se invierte la dirección de uno de los altavoces, para la cual se debe invertir también la fase en la tensión eléctrica de uno de ellos, a esta configuración se le denomina Push-Pull. Con esta configuración se corrigen algunas irregularidades producidas por la no linealidad del altavoz cuando la bobina se desplaza hacia el interior del circuito magnético o saliendo de este.

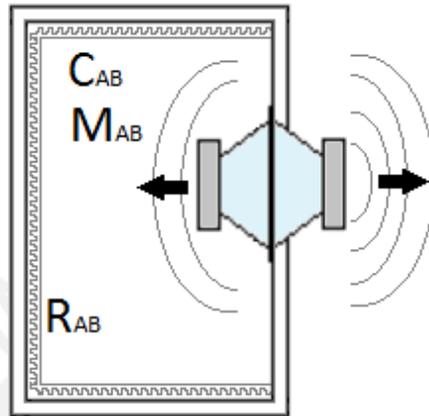


Figura 1.17: Sistema isobárico, montaje Push-Pull.

El modelo equivalente es similar al de un solo altavoz con algunas consideraciones que se verán más adelante en este capítulo (p. 22).

### 1.5 Modelo de tipo de impedancias

Se puede resumir los sistemas anteriores a un modelo general, en donde, las impedancias son agrupadas según la parte que corresponda; ya sea eléctrica ( $Z_E$ ), mecánica ( $Z_M$ ), acústica lado frontal ( $Z_{AF}$ ) o acústica lado posterior ( $Z_{AP}$ ). En la Figura 1.18 se observa el circuito eléctrico correspondiente al modelo general propuesto.

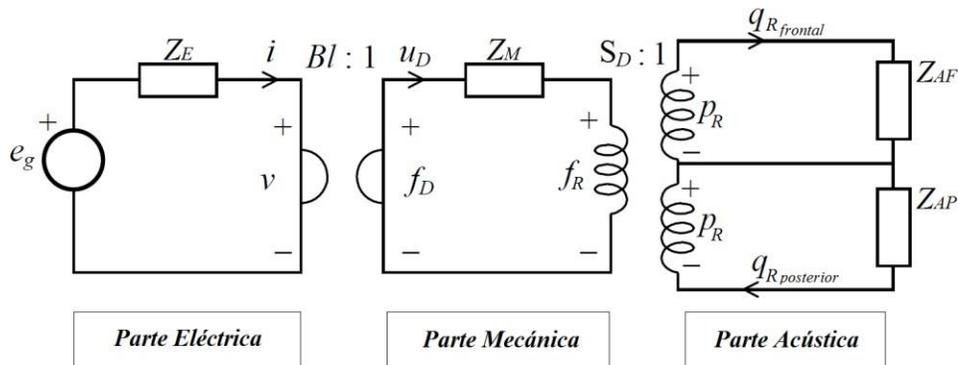


Figura 1.18. Modelo de impedancia.

### 1.5.1 Modelo reflejado a la parte eléctrica

En la Figura 1.9 se observa el circuito eléctrico equivalente con todas las impedancias estudiadas reflejadas a la parte eléctrica del altavoz.

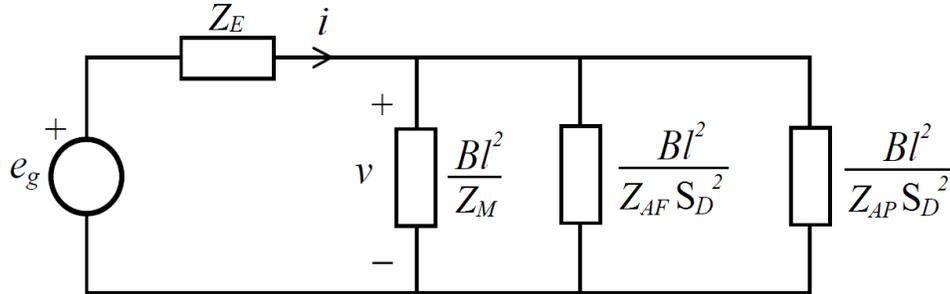


Figura 1.19: Modelo reflejado al lado eléctrico.

Desarrollando el diagrama de la Figura 1.9 se obtiene la impedancia total del sistema ( $Z_{total}$ ).

$$Z_{total} = \frac{e_g}{i} = Z_E + Z_M + Z_{AF} \cdot S_D^2 + Z_{AP} \cdot S_D^2 \quad (1.17)$$

### 1.5.2 Modelo reflejado a la parte mecánica

En la Figura 1.20 se observa el circuito eléctrico equivalente con las impedancias reflejadas a la parte mecánica del altavoz; en donde, es posible deducir, en función del voltaje emitido por la fuente ( $e_g$ ), el valor de la fuerza aplicada por el circuito magnético ( $f_D$ ) y la fuerza con la cual el diafragma empuja al volumen de aire ( $f_R$ ).

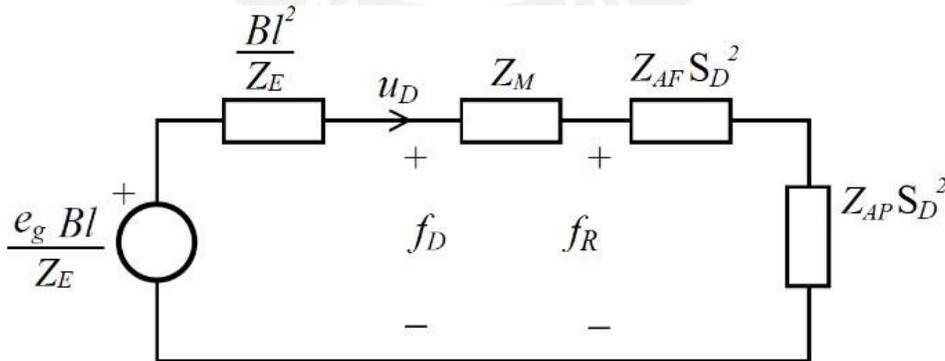


Figura 1.20: Modelo reflejado al lado mecánico.

$$f_D = \frac{e_g \cdot Bl \cdot (Z_M + Z_{AF} \cdot S_D^2 + Z_{AP} \cdot S_D^2)}{Bl^2 + Z_E \cdot (Z_M + Z_{AF} \cdot S_D^2 + Z_{AP} \cdot S_D^2)} \quad (1.18)$$

$$f_R = \frac{f_D \cdot (Z_{AF} \cdot S_D^2 + Z_{AP} \cdot S_D^2)}{(Z_M + Z_{AF} \cdot S_D^2 + Z_{AP} \cdot S_D^2)} \quad (1.19)$$

### 1.5.3 Modelo reflejado a la parte acústica

En la Figura 1.21 se observa el modelo general reflejado a la parte acústica del altavoz; en donde se aprecian dos fuentes de voltaje iguales, dependientes de  $f_R$ , que alimentan a la impedancia acústica frontal y posterior.

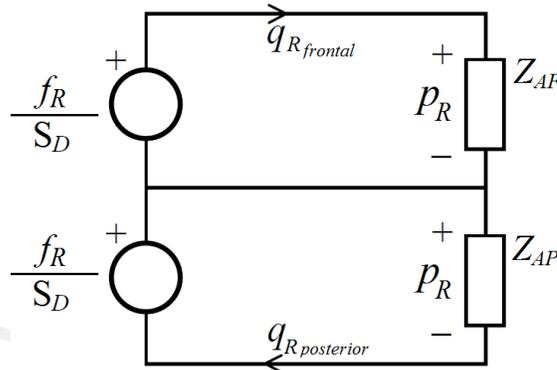


Figura 1.21: Modelo reflejado al lado acústico.

$$p_R = \frac{f_R}{S_D} \quad (1.20)$$

## 1.6 Consideraciones prácticas

### 1.6.1 Selección de gabinete

Debido a que no todos los altavoces son adecuados para los diferentes tipos de gabinetes, se suele tomar en cuenta un parámetro denominado Producto Eficiencia por Ancho de Banda ( $EBP$ ) para elegir el tipo de gabinete y se calcula dividiendo la frecuencia de resonancia ( $f_s$ ) entre el factor de calidad eléctrico ( $Q_{ES}$ ) del altavoz. (Small)

$$EBP = \frac{f_s}{Q_{ES}} \quad (1.21)$$

Si el valor de  $EBP$  es menor a 50 se recomienda utilizar gabinete cerrado, si es mayor de 90 se recomienda gabinetes abiertos, si el valor se encuentra entre 50 y 90 puede ser cualquiera de los dos. (Pueo Ortega & Romá Romero, 2003)

## 1.6.2 Configuración de altavoces

Si se desea agregar más de una unidad del mismo altavoz al gabinete, se pueden colocar en las siguientes configuraciones.

### 1.6.2.1 Montaje convencional

En esta configuración se colocan dos o más altavoces iguales, lo más cercano posible, en el mismo gabinete. En la Figura 1.22 se muestra un ejemplo de montaje convencional para dos unidades de altavoces.

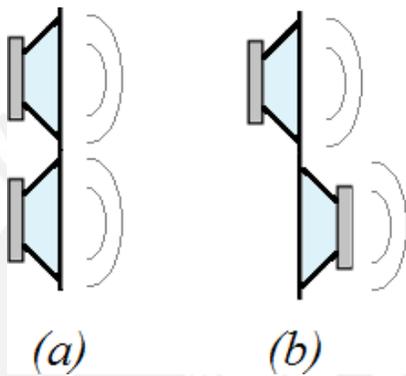


Figura 1.22: Montaje convencional para dos unidades.

### 1.6.2.2 Montaje isobárico

En esta configuración se colocan dos o más altavoces iguales, uno en oposición al otro lo más cercano posible, en el mismo gabinete. En la Figura 1.23 se muestra un ejemplo de montaje isobárico para dos unidades de altavoces.

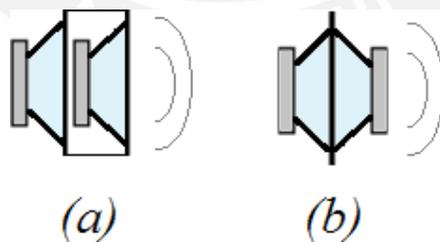


Figura 1.23: Montaje isobárico para dos unidades. (a) Convencional. (b) Push-Pull.

### 1.6.2.3 Conexión eléctrica

Los altavoces se pueden conectar eléctricamente en serie o paralelo como se muestra en la Figura 1.24 y puede expandirse a más de dos unidades.

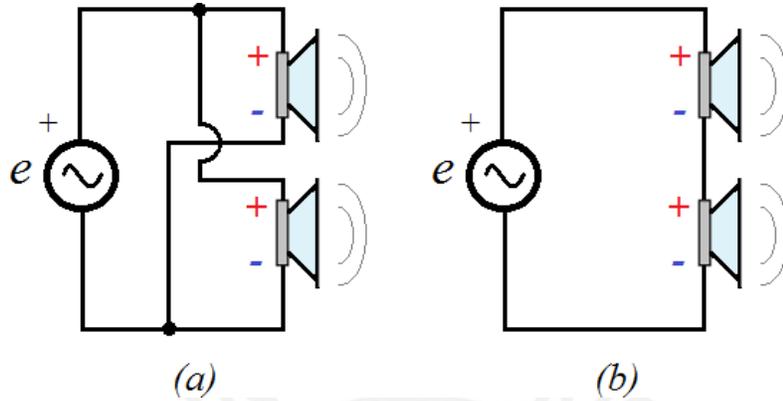


Figura 1.24: (a) Conexión en paralelo. (b) Conexión en serie.

En ocasiones, es necesario invertir la fase de la conexión eléctrica de los altavoces; como, por ejemplo, la utilizada en la configuración Push-Pull, en donde se invierte la fase de uno de los altavoces para ser coherentes con la disposición de los mismos en el gabinete. En la Figura 1.25 se aprecia las conexiones eléctricas descritas para el ejemplo de este párrafo.

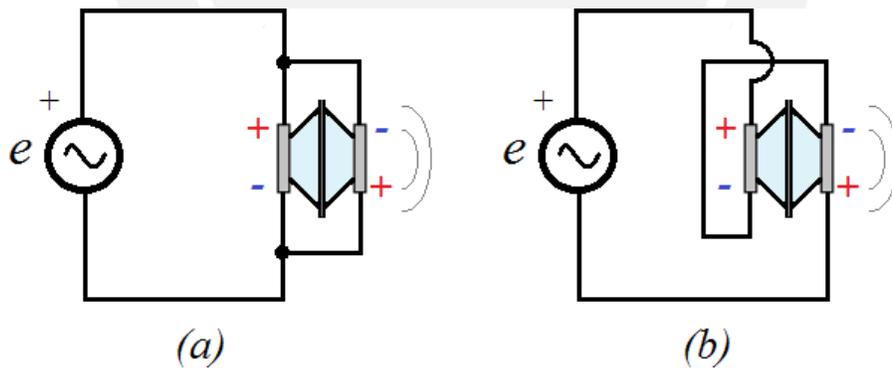


Figura 1.25. Conexión eléctrica (con fase invertida) para la configuración Push-Pull. (a) Conexión en paralelo. (b) Conexión en serie.

### 1.6.2.4 Consideraciones de trabajo en las configuraciones

Las configuraciones de más de una unidad de altavoces se pueden trabajar como si fueran de sólo una, para ello se debe considerar lo siguiente:

- La frecuencia de resonancia ( $f_s$ ) y el factor de calidad total ( $Q_{TS}$ ) no varían, es decir, serán los mismos que los de una sola unidad.
- El volumen de aire equivalente ( $V_{AS}$ ) será multiplicado o dividido por el número de altavoces según sea la configuración convencional o isobárica respectivamente.
- El área efectiva de radiación ( $S_D$ ) queda multiplicada por el número de altavoces en el montaje convencional, pero se mantiene igual en el montaje isobárico.
- La impedancia eléctrica ( $Z_E$ ) es multiplicada o dividida según el número de altavoces si se conecta en serie o paralelo respectivamente.

De lo descrito en el párrafo anterior, se construye la Tabla 1.4; en donde, se exponen las consideraciones, según el tipo montaje y conexión eléctrica, para cada uno de los parámetros del altavoz cuando se requiera trabajar con  $N$  unidades idénticas.

Tipo de parámetro	Conexión en Serie		Conexión en Paralelo	
	Convencional	Isobárico	Convencional	Isobárico
$R_E$	$N \cdot R_E$	$N \cdot R_E$	$R_E/N$	$R_E/N$
$L_E$	$N \cdot L_E$	$N \cdot L_E$	$L_E/N$	$L_E/N$
$M_{MS}$	$N \cdot M_{MS}$	$N \cdot M_{MS}$	$N \cdot M_{MS}$	$N \cdot M_{MS}$
$C_{MS}$	$C_{MS}/N$	$C_{MS}/N$	$C_{MS}/N$	$C_{MS}/N$
$R_{MS}$	$N \cdot R_{MS}$	$N \cdot R_{MS}$	$N \cdot R_{MS}$	$N \cdot R_{MS}$
$F_S$	$F_S$	$F_S$	$F_S$	$F_S$
$Bl$	$N \cdot Bl$	$N \cdot Bl$	$Bl$	$Bl$
$S_D$	$N \cdot S_D$	$S_D$	$N \cdot S_D$	$S_D$
$V_{AS}$	$N \cdot V_{AS}$	$V_{AS}/N$	$N \cdot V_{AS}$	$V_{AS}/N$
$Q_{ES}$	$Q_{ES}$	$Q_{ES}$	$Q_{ES}$	$Q_{ES}$
$Q_{MS}$	$Q_{MS}$	$Q_{MS}$	$Q_{MS}$	$Q_{MS}$
$Q_{TS}$	$Q_{TS}$	$Q_{TS}$	$Q_{TS}$	$Q_{TS}$

Tabla 1.4. Consideraciones de trabajo para un sistema de  $N$  altavoces idénticos según el tipo de conexión eléctrica y montaje.

### **1.6.3 Consideraciones de trabajo para el gabinete**

Con respecto al gabinete en donde se montará el altavoz se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El gabinete no debe contribuir al sonido del altavoz para ello se recomiendan materiales rígidos y de alta densidad
- En algunos diseños para minimizar costos y mejorar sus características se añaden elementos rigidizantes que minimizan la radiación de las paredes del gabinete.
- Normalmente es necesario añadir material absorbente en el interior del gabinete para controlar los modos internos de la cavidad; este material añadido es de característica porosa. Es conocido que la propagación de una onda sonora en el aire es adiabática, sin embargo; cuando la onda se propaga en un material poroso las condiciones termodinámicas de propagación cambian de adiabáticas a isotérmicas. El efecto de esta propagación es un incremento del camino acústico, lo que el altavoz percibe como un incremento del volumen efectivo. Este incremento nunca será mayor al 30% del volumen inicial.

## **1.7 Parámetros físicos a evaluar en la salida del altavoz**

A continuación, se presentan los principales parámetros físicos que son evaluados en la respuesta del altavoz.

### **1.7.1 Impedancia (Magnitud y fase)**

La importancia de la curva de impedancias radica en que ella muestra en un solo gráfico los efectos de la resistencia del altavoz, el efecto inductivo, la presencia de corrientes parásitas y la movilidad mecánica del mismo; todos estos efectos superpuestos. En resumen, condensan en una sola gráfica la parte eléctrica, mecánica y acústica reflejadas al lado eléctrico.

Debido a la presencia de corrientes parásitas, en el circuito magnético del altavoz, que interactúan con la reactancia de la bobina, se considera que existe un efecto semi-inductivo en la alta frecuencia; esto se puede corroborar en la Figura 1.26, en donde, se observa que la fase en la alta frecuencia tiende a 45 grados.

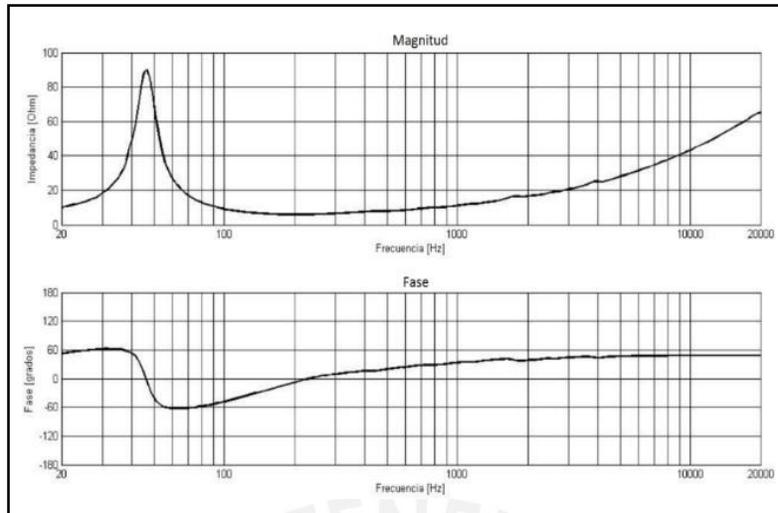


Figura 1.26: Modelo típico de la magnitud y fase de la impedancia eléctrica de un altavoz electrodinámico. (Ramón, 2016)

### 1.7.2 Desplazamiento de la bobina

Esta gráfica, muestra el desplazamiento de la bobina según la frecuencia emitida por el altavoz. La importancia de conocer este comportamiento radica en que no se debe exceder el máximo desplazamiento permitido para la bobina dentro del entrehierro; ya que, esto no sólo agregaría distorsión a la respuesta del altavoz, sino que, podría dañar al altavoz de forma permanente.

El desplazamiento de la bobina en frecuencia  $X(\omega)$  se obtiene aplicando la transformada de Fourier a la integral de la velocidad del movimiento de la bobina en el tiempo  $u(t)$ , como se aprecia en la siguiente ecuación:

$$x(t) = \int u(t)dt \quad \overset{F}{\leftrightarrow} \quad X(\omega) = \frac{U(\omega)}{\omega} \quad (1.22)$$

En la Figura 1.27 se aprecia un ejemplo de desplazamiento de la bobina para un sistema de gabinete cerrado y otro para un sistema reflector de bajos.

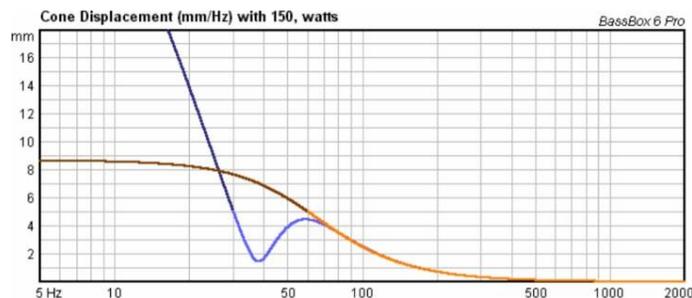


Figura 1.27: Desplazamiento del cono de un altavoz (12 B100/R) aplicando 150w para dos sistemas diferentes. Gabinete cerrado (curva naranja) y gabinete reflector de bajos (curva azul). (Beyma, 2018)

### 1.7.3 Nivel de presión sonora (Magnitud y fase)

El nivel de presión sonora ( $L_p$ ) es la relación entre la presión sonora efectiva ( $P$ ) del altavoz y una presión sonora eficaz de referencia ( $p_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ), la Magnitud del nivel de presión sonora se expresa en dB como se muestra en la siguiente ecuación:

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{|P|}{p_{ref}} \right) \quad (1.23)$$

El valor de la presión sonora efectiva se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = \frac{q \cdot \rho_0 \cdot \omega}{2\pi \cdot r} \hat{f} \quad (1.24)$$

Donde  $q$  es la velocidad de volumen eficaz,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $\rho_0$  es la densidad del aire y  $r$  es la distancia a la que se encuentra el punto de medición (en este caso  $r=1$ ).

En la Figura 1.28 se observa la gráfica de la magnitud del nivel presión sonora del altavoz *FaitalPRO 3FE20*.

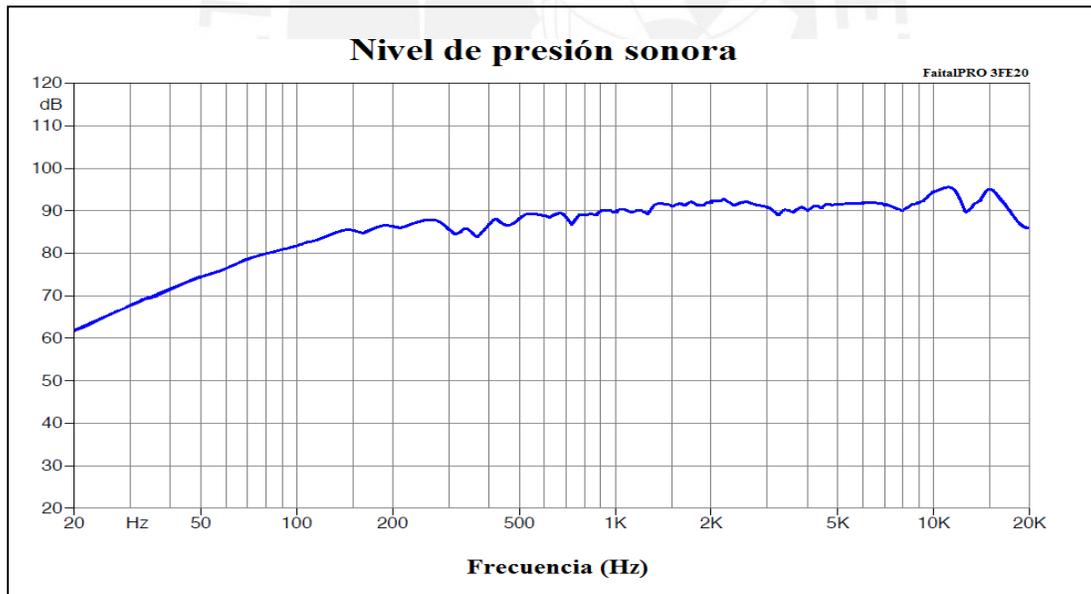


Figura 1.28: Nivel de presión sonora de altavoz *FaitalPRO 3FE20*. (FaitalPRO, 2019)

### 1.7.4 Nivel de Potencia acústica

El nivel de potencia acústica ( $L_W$ ) es la relación en decibeles entre la potencia activa emitida por la fuente con respecto a una potencia acústica de referencia ( $W_{ref} = 10^{-12}$  watt).

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (1.25)$$

Para el cálculo de la potencia acústica se utiliza la siguiente ecuación:

$$W = q^2 \cdot Re[Z_{AR}] \quad (1.26)$$

Donde ( $q$ ) es la velocidad de volumen eficaz y  $Re[Z_{AR}]$  es la parte real de la impedancia de radiación acústica de salida que se desea evaluar.

### 1.7.5 Retardo de grupo

El retardo de grupo nos da una idea de la demora que experimentará, según la frecuencia, la señal de entrada del altavoz. Se expresa el retardo de grupo como el negativo de la derivada de la fase del nivel de presión sonora.

$$\tau(\omega) = -\frac{d}{d(\omega)} \varphi(\omega) \quad (1.27)$$

Este parámetro es muy importante cuando se evalúan cajas acústicas que irradian a distintos anchos de banda, pero en conjunto deben cubrir, normalmente, gran parte del espectro audible.

### 1.7.6 Respuesta al escalón unitario

Se define la respuesta al escalón unitario  $g(t)$  como la integral de la respuesta al impulso  $h(t)$  del sistema. En nuestro caso se obtiene con la transformada de Fourier inversa del nivel de presión sonora (en escala lineal) dividido entre la frecuencia ( $\omega$ ).

$$g(t) = \int h(t) dt \overset{F}{\leftrightarrow} \frac{H(\omega)}{\omega} \quad (1.28)$$

La respuesta al escalón unitario nos permite evaluar cómo responde el altavoz ante cambios súbitos en la entrada y nos da una idea del tiempo que le tomará alcanzar un estado estable.

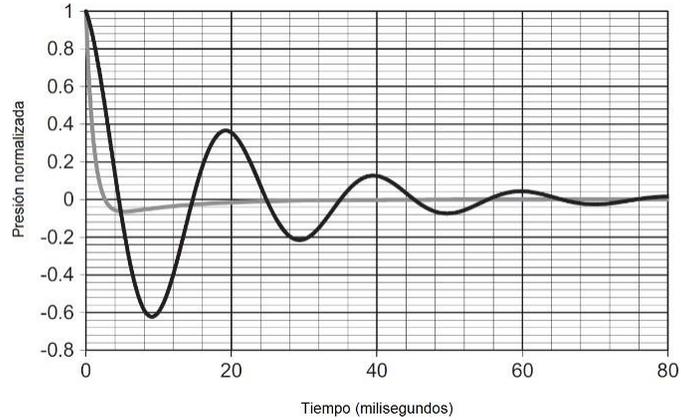


Figura 1.29: Gráfica con la respuesta al escalón unitario de dos altavoces un con  $Q_{ts} = 3$  (curva negra) y el otro con  $Q_{ts} = 0.3$  (gris). (Beranek & Mellow, 2012)

### 1.7.7 Eficiencia

Es la relación entre la potencia de radiación acústica ( $W$ ) emitida por el altavoz y la potencia eléctrica ( $W_E$ ) suministrada por la fuente. Se obtiene el valor de la eficiencia ( $\eta_0$ ) con la siguiente ecuación:

$$\eta_0 = \frac{W}{W_E} \quad (1.29)$$

$$W_E = \frac{|e_g|^2}{R_E} \quad (1.30)$$

En donde se observa que la potencia eléctrica suministrada es el voltaje ( $e_g$ ) al cuadrado entre la resistencia eléctrica ( $R_E$ ) del altavoz.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMA DE MULTIVIAS

En este capítulo se presentan los sistemas conformados por uno o más altavoces ubicados dentro de un mismo gabinete acústico. Para obtener la respuesta total del sistema, se modela cada altavoz en el rango del pistón rígido, con las limitaciones del modelo presentado en esta tesis, y luego se suman las respuestas individuales (considerando la magnitud y la fase).

En la primera parte, se clasifican los altavoces según el rango de frecuencia de trabajo y finalmente, se describen las principales redes de cruce pasivas empleadas en el proceso de diseño.

#### 2.1 Clasificación de altavoces según el rango de frecuencia

Según el rango de frecuencias, los altavoces se clasifican:

- **Altavoz de alta frecuencia (Tweeter):** empleados para reproducir las altas frecuencias del espectro musical; su rango de operación se encuentra, usualmente, entre 4 y 20 kHz.
- **Altavoces de rango medio (Mid-Range):** empleados para reproducir las frecuencias medias del espectro musical; su rango de operación se encuentra, como máximo, entre 500 Hz y 5 kHz.
- **Altavoz de media-baja frecuencia (Midwoofer):** reproducen eficientemente los sonidos medios-bajos del espectro musical. Su rango de operación se encuentra entre 300 Hz y 3 kHz.
- **Altavoz de baja frecuencia (Woofers):** empleados para reproducir las bajas frecuencias del espectro musical; su rango de operación se encuentra, como máximo, entre 20 y 800 Hz.
- **Altavoz para sub-bajos (Subwoofer):** Son altavoces diseñados para reproducir de forma óptima el extremo inferior del rango audible, es importante mencionar que algunos subwoofers son capaces de reproducir sonidos subsónicos.
- **Altavoz de rango completo (Full-Range):** son altavoces con un amplio espectro de frecuencia, reproducen las altas, medias y bajas frecuencias de manera aceptable. El rango de operación puede estar entre 60 Hz y 17 kHz.

Como cada altavoz opera óptimamente en un rango de frecuencias determinado; es usual utilizar sistemas de altavoces que emplean transductores con distintos anchos de banda, patrón de radiación, dimensiones y capacidad de manejo de potencia; los cuales en conjunto reproducen el

espectro deseado; para ello se alimenta cada altavoz a través de vías, que contienen circuitos eléctricos, conocidas como redes de cruce (Crossover).

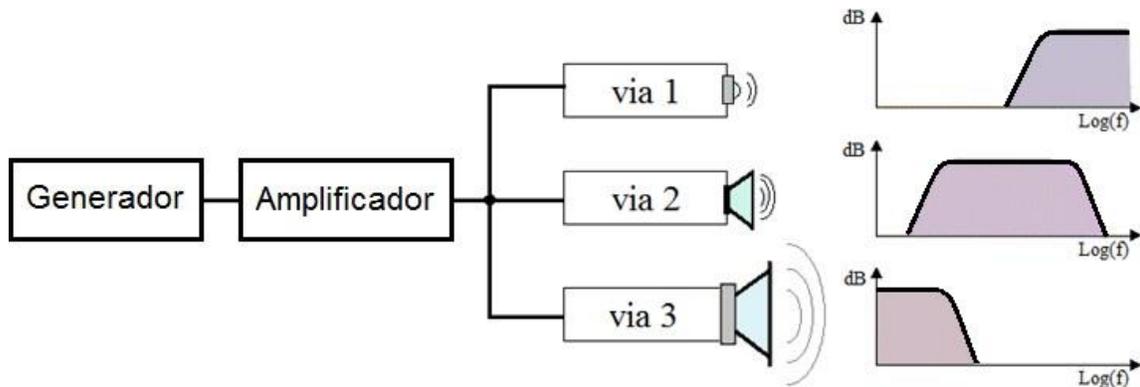


Figura 2.1: Sistema de redes de cruce para tres vías.

## 2.2 Redes de cruce pasivas

Las redes de cruce pasivas son conjuntos de filtros; circuitos compensadores y correctores que se conectan entre la salida del amplificador y la entrada del altavoz.

A continuación, se presentan los elementos que intervienen en su construcción.

### 2.2.1 Filtros Pasa bajo

El filtro pasa bajo se caracteriza por dejar pasar las señales de bajas frecuencias hasta una frecuencia de corte determinada. En la Figura 2.2 se muestra un diagrama de filtro pasivo típico en donde las impedancias  $Z_S$  son bobinas y  $Z_P$  son condensadores. El número total de componentes  $Z$  indica el orden del filtro.

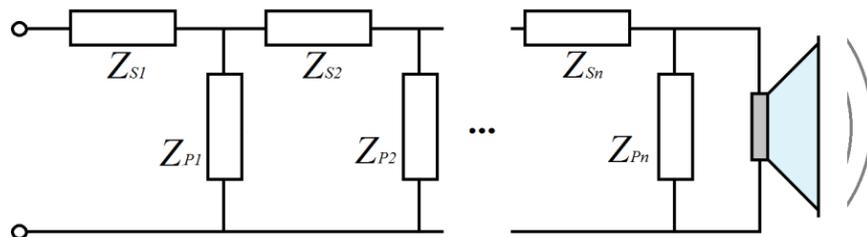


Figura 2.2: Diagrama de filtro típico.

Antes de empezar el proceso de diseño se debe elegir el ancho de banda, la frecuencia de corte, el orden del filtro, el tipo de función de transferencia (Butterworth, Linkwitz-Riley, Bessel, etc.) que determinará, finalmente, el comportamiento de amplitud y fase del mismo.

En la Figura 2.3 se aprecia cómo cambia la pendiente de la función de transferencia conforme se incrementa el orden del filtro.

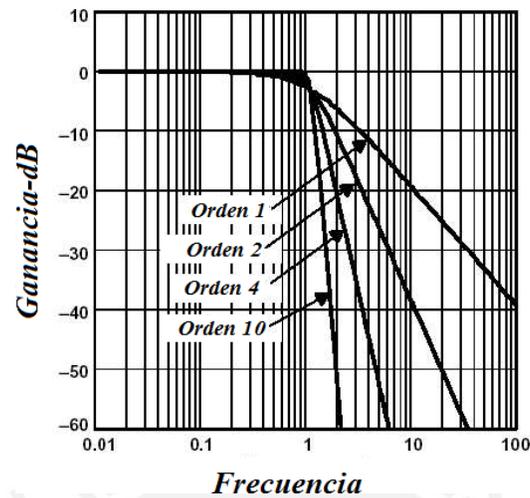


Figura 2.3: Ejemplo de un filtro Pasa-bajo con aproximación Butterworth, frecuencia de corte 1Hz. Se observa la variación para orden 1, 2, 4 y 10. (Dovale, 2019)

En la Figura 2.4 se observa las gráficas para diferentes tipos de funciones de transferencia.

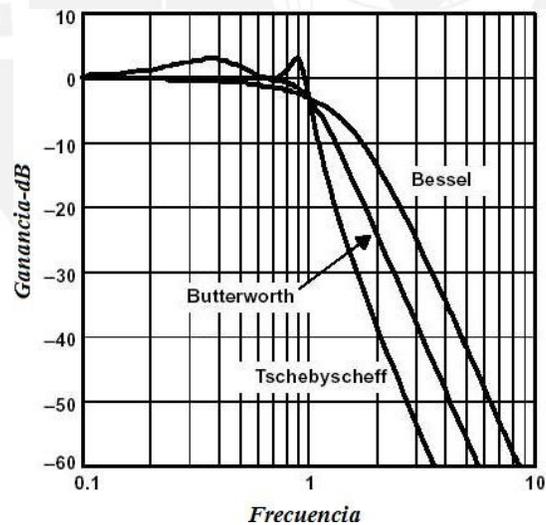


Figura 2.4: Ejemplo de un filtro Pasa-bajo frecuencia de corte 1Hz. Para aproximación Butterworth, Bessel y Tschebyscheff. (Dovale, 2019)

### 2.2.2 Filtros pasa alto

El filtro pasa alto se caracterizan por dejar pasar las señales de altas frecuencias a partir de una frecuencia de corte determinada. El circuito se puede construir tomando en cuenta la Figura 2.2, en

donde las impedancias  $Z_S$  son condensadores y  $Z_P$  son bobinas. El número total de componentes  $Z$  indica el orden del filtro.

Para elegir el valor de los componentes se toman las mismas consideraciones (banda de interés, pendiente, aproximación, etc.) utilizadas para un filtro pasa bajo.

### 2.2.3 Filtros pasa banda

El filtro Pasa banda se caracterizan por dejar pasar las señales dentro de un rango de frecuencias determinado. El circuito se puede construir tomando en cuenta la Figura 2.2 en donde las impedancias de  $Z_S$  son un arreglo de bobina y condensador que resuenan en serie y  $Z_P$  un arreglo de bobina y condensador que resuenan en paralelo. El número total de componentes  $Z$  indica el orden del filtro.

Para elegir el valor de los componentes se toman las mismas consideraciones (banda de interés, pendiente, función de transferencia, etc.) utilizadas para un filtro pasa bajo.

### 2.2.4 Filtros Rechaza banda

El filtro rechaza banda, no deja pasar las señales dentro de un rango de frecuencias determinado. El circuito se puede construir tomando en cuenta la Figura 2.2 en donde las impedancias de  $Z_S$  son un arreglo de bobina y condensador que resuenan en paralelo y  $Z_P$  un arreglo de bobina y condensador que resuenan en serie. El número total de componentes  $Z$  indica el orden del filtro.

Para elegir el valor de los componentes se toman las mismas consideraciones que los filtros anteriores.

### 2.2.5 Red Zobel compensadora de efecto inductivo

Se utiliza para eliminar el aumento de impedancia debido a la inductancia de la bobina móvil. La Figura 2.5 muestra el diagrama esquemático del circuito compensador de efecto inductivo (Dickanson, 2006).

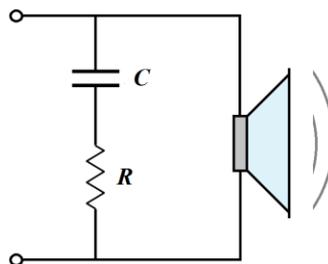


Figura 2.5: Circuito compensador de efecto inductivo.

$$R = 1.25R_E \quad (2.1)$$

$$C = \frac{L_E}{R^2} \quad (2.2)$$

### 2.2.6 Circuito anti-resonante

Este tipo de filtro se sintoniza a la frecuencia de resonancia del altavoz; su función es atenuar el pico que presenta la impedancia del altavoz debido a la resonancia mecánica. La Figura 2.6 muestra el diagrama esquemático del circuito anti-resonante (Dickanson, 2006).

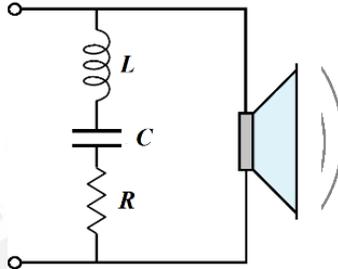


Figura 2.6: Circuito anti resonante.

$$C = \frac{0.1592}{R_E \cdot Q_{ES} \cdot f_s} \quad (2.3)$$

$$L = \frac{0.1592(Q_{ES} \cdot R_E)}{f_s} \quad (2.4)$$

$$R = R_E + \frac{Q_{ES} \cdot R_E}{Q_{MS}} \quad (2.5)$$

### 2.2.7 Circuito tanque con Q variable

Se utiliza para atenuar los picos no deseados en la respuesta del altavoz como se observa en la Figura 2.7.

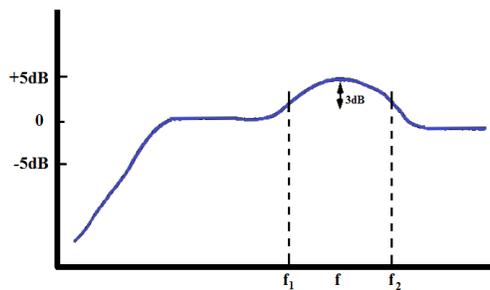


Figura 2.7: Ejemplo de pico en respuesta de altavoz que se desea atenuar.

En la Figura 2.8 se observa el circuito que se debe implementar.

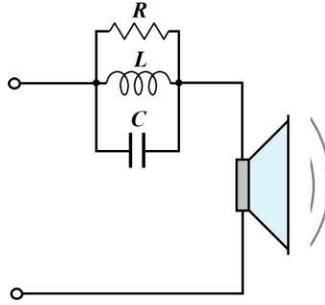


Figura 2.8. Circuito Tanque con Q variable.

$$C = \frac{0.03003}{f_0} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{0.2252}{f_0^2 \cdot C} \quad (2.7)$$

$$R = \frac{1}{6.2832 \mathcal{B}} \quad (2.8)$$

$$B = \Delta f = f_1 - f_2 \quad (2.9)$$

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (2.10)$$

Donde  $f_0$  es la frecuencia del pico que desea atenuar,  $f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias en las que el pico cae -3dB,  $B$  es el ancho de banda y  $Q$  es el factor de calidad del filtro.

### 2.2.8 Red zobel correctora de fase

Se utiliza para corregir la fase de la respuesta del altavoz sin variar su ganancia; para ello se debe conocer la cantidad de fase ( $\varphi$ ) que se desea desplazar a una frecuencia ( $f$ ) determinada y elegir uno de los dos circuitos mostrados en la Figura 2.10 tomando en cuenta lo siguiente:

- Si se desea disminuir la fase ( $-\pi \geq \varphi \geq 0$ ) se debe utilizar el circuito de la Figura 2.10.(a) y se calcula el valor de la inductancia ( $L$ ) con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{-R * \tan(\varphi/2)}{2. \pi. f} \quad (2.11)$$

- Si se desea aumentar la fase ( $0 \geq \varphi \geq \pi$ ) se debe utilizar el circuito de la de la Figura 2.10.(b) y se calcula el valor de la inductancia ( $L$ ) con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{-R * \text{Tan}((\varphi - \pi)/2)}{2. \pi. f} \quad (2.12)$$

En ambos casos,  $f$  es la frecuencia en la que se desea desplazar la fase y  $R$  es el valor de la parte resistiva del altavoz a esa frecuencia.

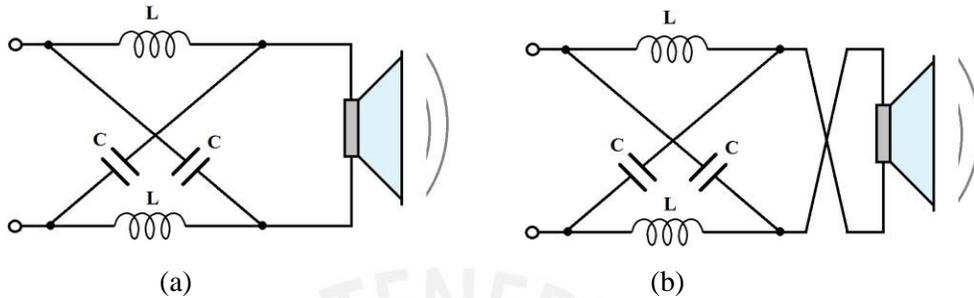


Figura 2.9: (a) Circuito ecualizador cuando se desea disminuir la fase. (b) Circuito ecualizador cuando se desea incrementar la fase

Una vez obtenido el valor de la Inductancia ( $L$ ) se procede a calcular la frecuencia media ( $f_m$ ) y con esta última, se obtiene el valor de la capacitancia ( $C$ ).

$$f_m = \frac{R}{2. \pi. L} \quad (2.13)$$

$$C = \frac{1}{L. (2\pi. f_m)^2} \quad (2.14)$$

### 2.2.9 Atenuador L-Pad

Se utiliza para atenuar la ganancia del altavoz; esto es necesario cuando se desea una respuesta plana del conjunto de altavoces, pero uno de ellos presenta una ganancia elevada en comparación con los demás. En la Figura 2.10 se observa el circuito que se debe implementar. (Dickanson, 2006)

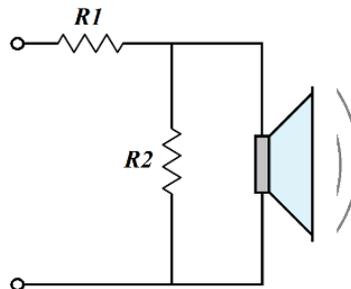


Figura 2.10: Circuito Atenuador L-Pad.

$$R_2 = \frac{Z. 10^{(A/20)}}{1 - 10^{(A/20)}} \quad (2.15)$$

$$R_1 = Z - \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{Z} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

Donde  $A$  es la atenuación deseada en decibelios y  $Z$  es la impedancia nominal del altavoz y además este circuito mantiene la impedancia original de la carga.

## CAPÍTULO 3

### PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL SOFTWARE

Aquí se describe el proceso de construcción del software de simulación de altavoces; para ello, se especifican cada una de las etapas del proceso con sus resultados respectivos.

En este capítulo no se incluye la etapa de pruebas; puesto que, las pruebas del software se presentarán en el siguiente capítulo.

#### 3.1 Etapas en el proceso de construcción de software

En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques con las etapas del proceso de construcción de software típico.

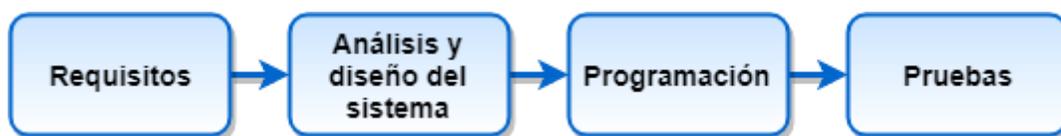


Figura 3.1: Diagrama de Bloques del proceso de construcción del software.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada etapa:

- **Requisitos:** En esta etapa se dan los requerimientos y se delimitan los alcances del software.
- **Análisis y diseño del sistema:** En esta fase se analizan los requisitos, se presentan los diagramas de interacción, diagramas de clases y las interfaces de salida de información.
- **Programación:** Aquí se elaboran los algoritmos (diagramas de flujo o pseudocódigos) y se codifican según el lenguaje de programación utilizado.
- **Pruebas:** En esta etapa se pone a prueba el software según los requerimientos iniciales.

## 3.2 Requisitos

### 3.2.1 Objetivo del software

El software tiene como objetivo simular un sistema de altavoces de hasta tres vías, dando la opción de configurar cada vía de manera independiente y mostrar los resultados en pantalla.

### 3.2.2 Requisitos del entorno

- El entorno de trabajo será una computadora de escritorio con sistema operativo Windows 10.
- Los datos para la simulación serán ingresados, haciendo uso del mouse y teclado, por medio de una interfaz gráfica que también servirá para mostrar los resultados de la misma.
- No deberá requerir la instalación de software adicional para su funcionamiento.

### 3.2.3 Requisitos generales del software

- Se permitirá el ingreso de hasta 3 vías simultáneamente.
- Las etapas de cada vía se configurarán de manera independiente.
- Se podrá invertir la fase de la señal de entrada en cada vía.
- El usuario tendrá la opción de configurar las características del gráfico (tipo, estilo, color, escalas) y guardar las gráficas con los resultados de la simulación.
- El software incluirá la opción de colocar, en cada vía, más de una unidad del mismo altavoz.

- Se mostrarán gráficos con los resultados parciales de cada vía y un gráfico con el resultado general del sistema.
- El resultado de la simulación consistirá en graficar la impedancia eléctrica, el desplazamiento de la bobina, el nivel de presión sonora, el nivel de potencia acústica, el retardo de grupo y la respuesta del sistema al escalón unitario. Todas en el dominio de la frecuencia (Magnitud y fase) a excepción de la respuesta al escalón unitario que estará en el dominio del tiempo.
- Para que el usuario pueda ver el efecto de cada variación en los datos de entrada, se tendrá la opción de graficar los resultados en forma acumulada.
- Se incluirá la posibilidad de mostrar en un gráfico, las impedancias del altavoz (eléctrica, mecánica, acústica); así como, la interacción entre los niveles de presión sonora de la parte frontal y posterior del altavoz.
- Es posible tener el resultado de la interacción de dos altavoces.

### **3.2.4 Requisitos en el sistema altavoz-gabinete**

#### **3.2.4.1 Requisitos altavoz**

- El usuario podrá elegir entre ingresar los parámetros EMA (Electro-Mecano-Acústicos) o Thiele-Small.
- El software incluirá la opción de agregar una o más unidades del mismo altavoz; especificando el tipo de configuración y conexión entre los mismos.

#### **3.2.4.2 Requisitos Gabinete**

- El usuario podrá elegir el tipo de gabinete donde será montado el altavoz.
- El volumen del gabinete se podrá determinar directamente o se calculará a partir de las dimensiones largo, ancho y altura.
- En cada gabinete acústico, el usuario tendrá la opción de agregar o quitar la cantidad de elementos acústicos que considere (ductos o radiadores pasivos).
- En el caso del ducto, el usuario tendrá la opción de elegir el tipo de corrección de borde, la cantidad de elementos y elegir como parámetro de entrada la frecuencia de resonancia del ducto o su longitud.
- Para elegir las características de entrada del gabinete acústico, se considerarán los parámetros mencionados en el capítulo 1.

### 3.2.5 Requisitos de los circuitos de redes de cruce y compensación

- Según los parámetros de entrada, se calcularán y mostrarán en pantalla los valores de los elementos del circuito obtenido, así como su diagrama esquemático.
- Se tendrá la posibilidad de ingresar o modificar los valores de los elementos del circuito eléctrico.
- Para simular el efecto de pérdidas por inserción en la bobina, se incluirá la posibilidad de introducir el valor de una resistencia en serie con la misma.

### 3.3 Análisis y Diseño del sistema

Luego de analizar los requisitos, se plantea trabajar cada vía por separado; de tal manera que, se obtenga el resultado general del sistema a partir de la suma de los resultados parciales de cada vía. Tal y como se detalla en el diagrama de la Figura 3.2.



Figura 3.2: Diagrama de bloques general de propuesta de desarrollo.

Del mismo modo, se propone que la configuración de los parámetros de entrada de cada uno de los elementos de una vía (elementos de la red de cruce y el sistema altavoz-gabinete) deba ser de forma independiente; de tal forma que, se pueda observar el resultado parcial de cada una de las partes y, en caso se requiera, indicar su función de transferencia. En la Figura 3.3 se muestra un diagrama de bloques con el desarrollo de la propuesta de trabajo de las etapas de cada vía.

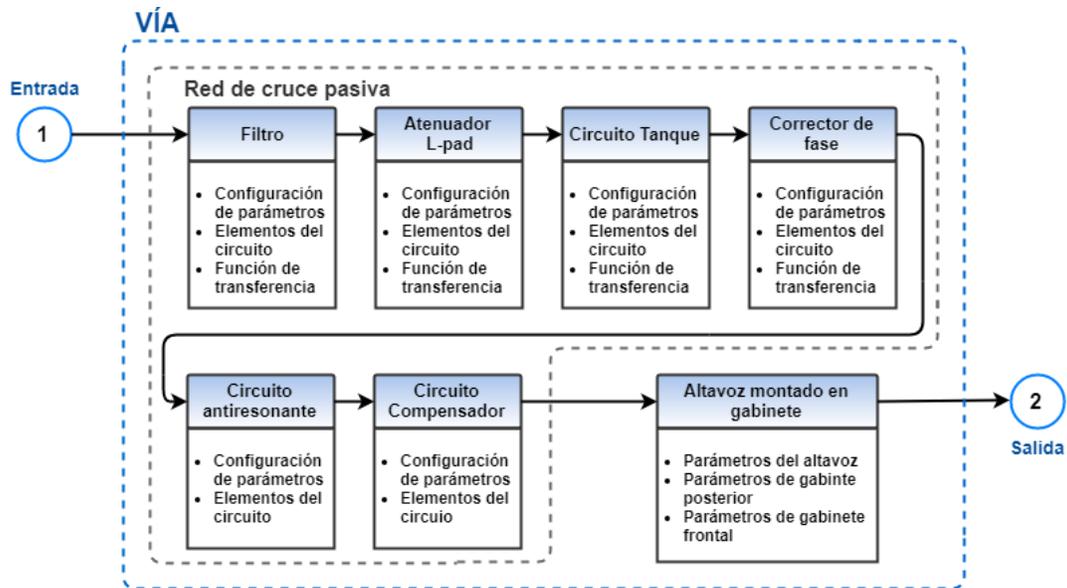


Figura 3.3: Diagrama de bloques de una Vía

Con esta forma de arquitectura, es posible tratar cada bloque de forma autónoma, dando lugar a que en caso se requiera agregar o modificar un bloque, esto se pueda realizar sin hacer grandes cambios en todo el diseño.

### 3.3.1 Diseño de clases

Identificadas la etapas del sistema, se crean las clases que serán utilizadas durante todo el proceso constructivo y, además, ayudarán a identificar claramente los parámetros que serán ingresados por usuario.

#### 3.3.1.1 Clases de configuración

En la clase “**Configuracion**” (las clases se definen sin tilde) se agrupan cuatro clases vinculadas a las configuraciones generales del sistema; las cuales son detalladas a continuación:

- La clase “**Datos\_ambientales**” incluye información acerca de las características del entorno de trabajo; como velocidad del sonido, presión de referencia, densidad del aire entre otros.
- La clase “**Datos\_frecuencia**” contiene información vinculada a las frecuencias de operación; como por ejemplo: rango, precisión, paso de frecuencia etc.
- La clase “**Datos\_grafico**” configura las características de las gráficas con los resultados de la simulación.
- La Clase “**Datos\_conexion**” incluye otras características que involucran al altavoz; como cantidad, tipo de configuración, modo de conexión, etc.

En la Figura 3.4 se presenta el diagrama de la clase “**Configuracion**” con sus clases heredadas.

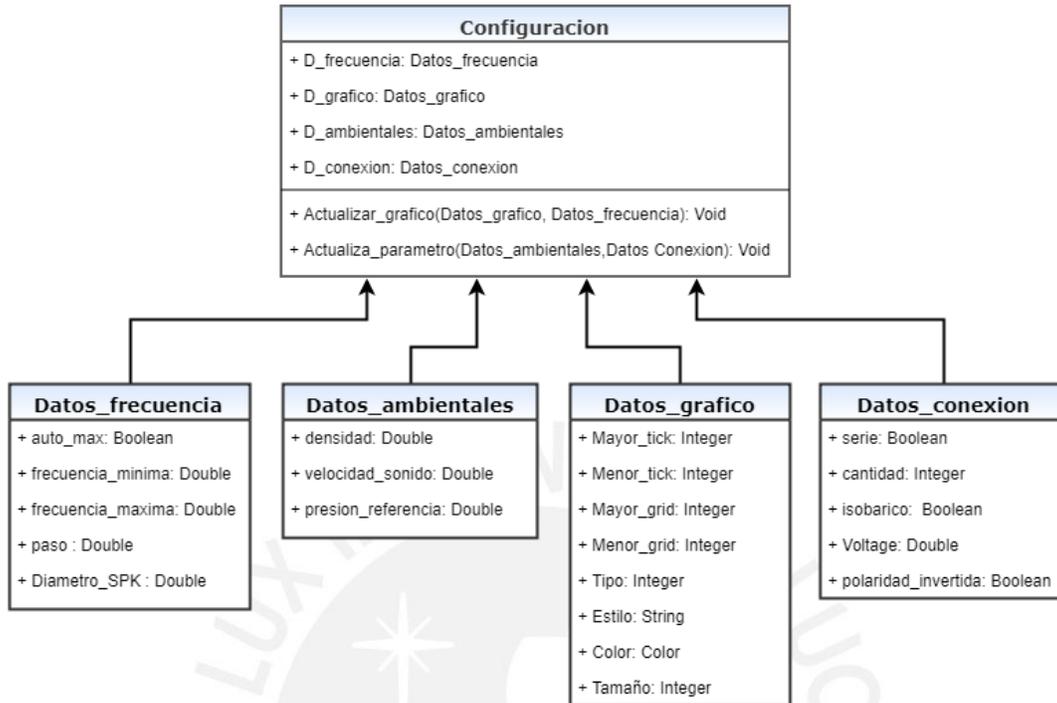


Figura 3.4: Diagrama de la clase “Configuracion” y sus clases heredades.

### 3.3.1.2 Clase vinculada a la magnitud y fase

El software desarrollado en esta tesis trabaja principalmente con números complejos o en su defecto con valores de magnitud y fase, es por esto que se define la clase “**Mag\_fase**”; la cual, sera tomada como herencia en las propiedades de las demás clases. En la *Figura 3.5* se observa el diagrama de esta clase.

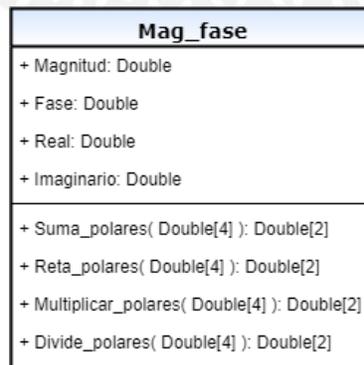


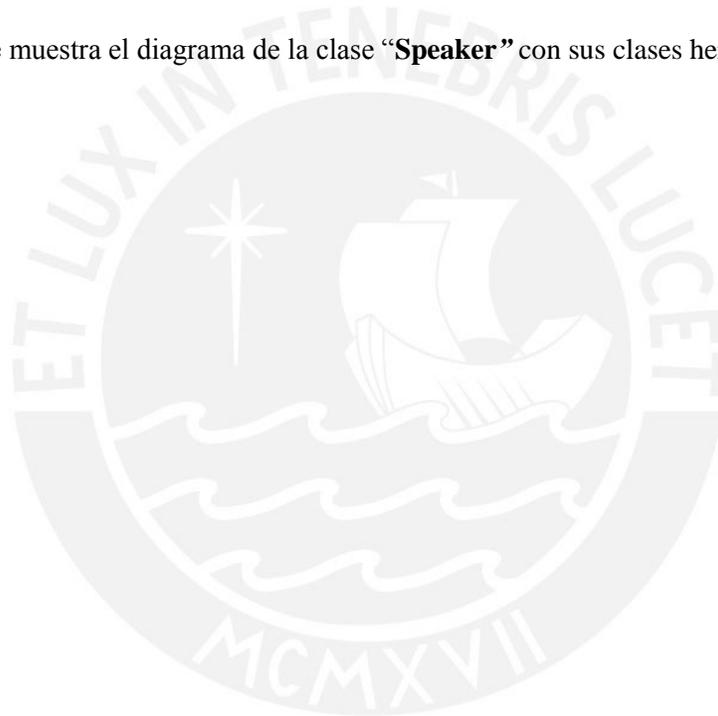
Figura 3.5: Diagrama de la clase “Mag\_fase”.

### 3.3.1.3 Clases asociadas al altavoz electrodinámico

En la clase “**Speaker**” se agrupan las propiedades vinculadas a los parámetros propios del altavoz; como son:

- Las propiedades relacionadas a la radiación acústica. (Clase “**Radiacion**”)
- Las propiedades relacionadas a la parte eléctrica del altavoz. (Clase “**Electrica**”)
- Las propiedades relacionadas a la parte mecánica del altavoz. (Clase “**Mecanica**”)
- Los parámetros Thiele-Small. (Clase “**Thiele\_Small**”)
- Los parámetros relacionados al excitador de compresión (caso especial). (Clase “**Exitador\_compresion**”)

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de la clase “**Speaker**” con sus clases heredadas.



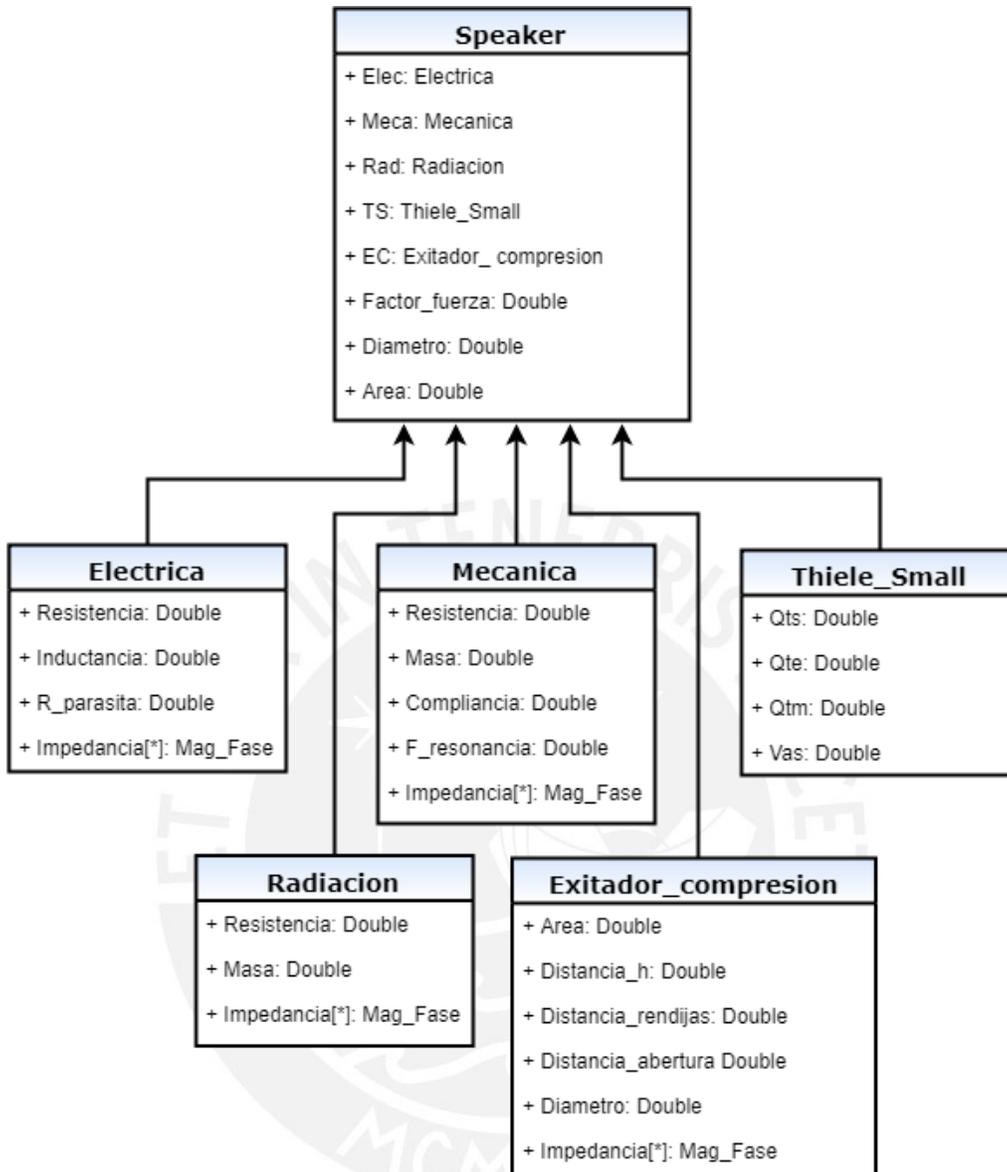


Figura 3.6: Diagrama de la clase "Speaker".

### 3.3.1.4 Clases asociadas a los elementos acústicos

La clase “**Elemento\_acustico**” hereda las clases cuyas propiedades hacen referencia a elementos acústicos como:

- Los parámetros del gabinete acústico. (Clase “**Gabinete**”)
- Los parámetros del ducto. (Clase “**Ducto**”, que asu vez hereda las clases “**Radiacion**” y “**Parámetros\_ducto**”).
- Parámetros del radiador pasivo. (Clase “**Radiador\_pasivo**”, que asu vez hereda las clases “**Mecanica**” y “**Radiacion**”).

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de la clase “**Elemento\_acustico**” y sus clases heredadas.

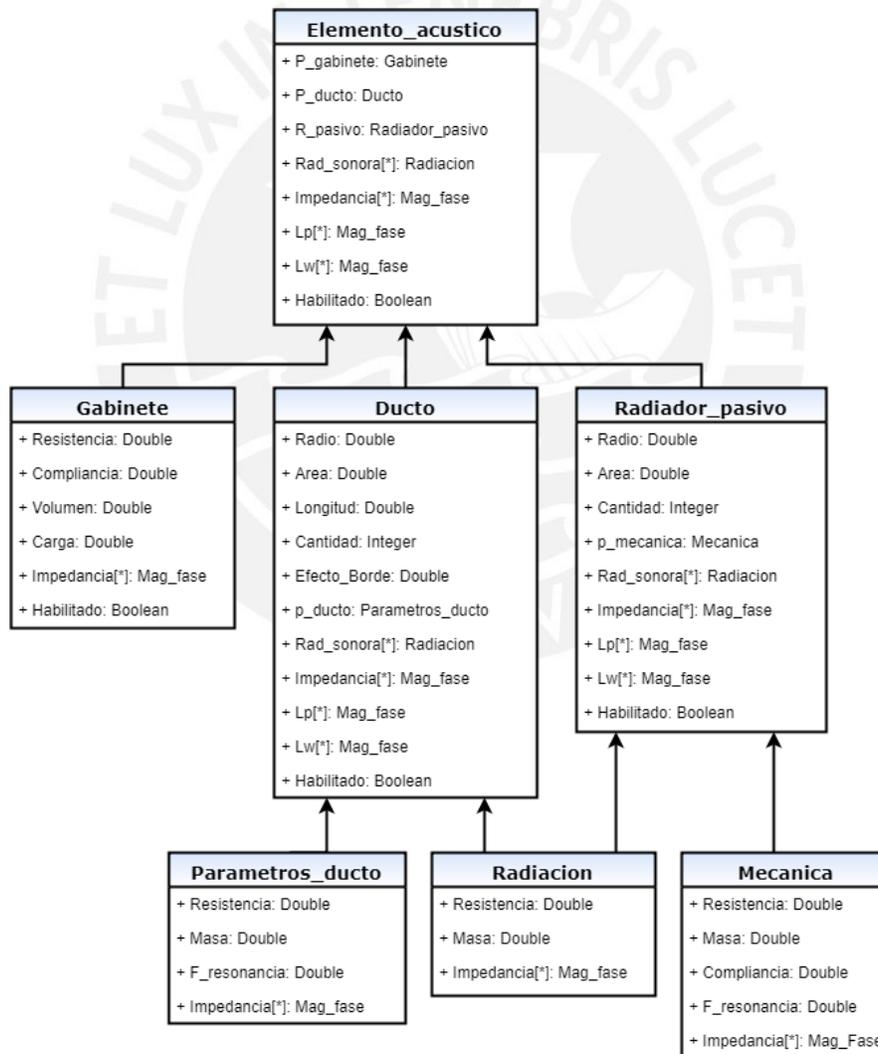


Figura 3.7: Diagrama de clase “**Elemento\_acustico**”.

### 3.3.1.5 Clases relacionadas a las etapas de la vía

#### 3.3.1.5.1 Clase “Speaker\_Box”

En esta clase se incluyen los parámetros del conjunto altavoz-gabinete. Recibe como herencia las clases “*Speaker*”, “*Elemento\_acustico*” y “*Configuracion*” cuyas propiedades ya fueron definidas en este capítulo (pp. 41-45). El diagrama correspondiente a esta clase se muestra en la Figura 3.8.

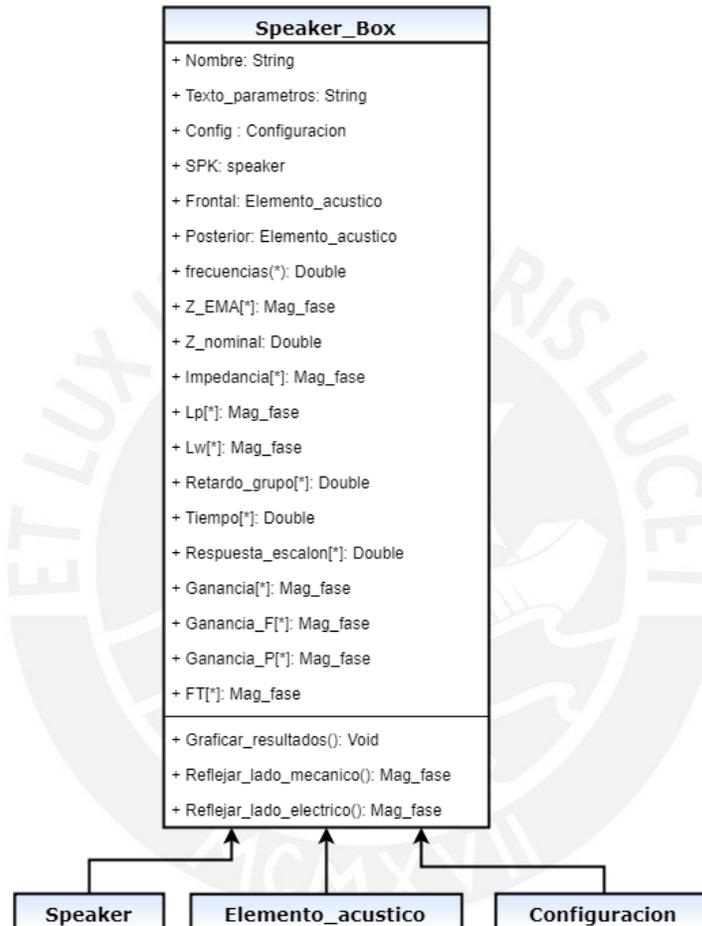


Figura 3.8: Diagrama de Clase “Speaker”.

### 3.3.1.5.2 Clase “Circuito”

Esta clase esta asociada a los parámetros de cada uno de los circuitos de la red de cruce. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama correspondiente a esta clase.

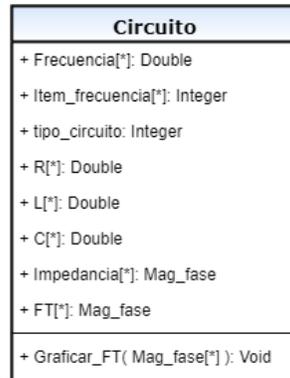


Figura 3.9: Clase “Circuito”.

### 3.3.1.5.3 Clase “Resultado”

En esta clase se almacenan los resultados de la simulación. En la Figura 3.10 se muestra el diagrama correspondiente a esta clase.

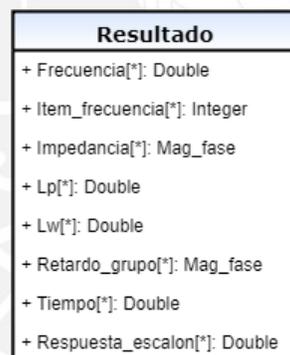


Figura 3.10: Diagrama de clase “Resultado”.

### 3.3.1.5.4 Clase “Via”

En esta clase se agrupan cada una de las etapas de una via. Recibe como herencia las clases “Speaker”, “Circuito” y “Resultado”; tal como se observa en el diagrama de clases expuesto en la Figura 3.11.

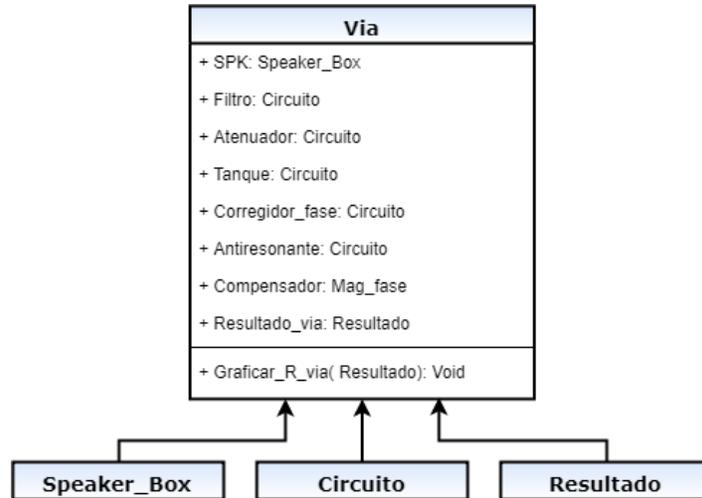


Figura 3.11: Diagrama de clase “Via”.

### 3.3.2 Diseño de formularios

A continuación, se presentan el diseño de los formularios incluidos en la interfaz grafica; cuya implemntacion se muestra en el capítulo siguiente (pp. 59).

#### 3.3.2.1 Formulario Configuraciones

Este formulario está vinculado a la clase “**Configuracion**” (p. 41) e incluye tres pestañas, las cuales se presentan a continuación:

##### 3.3.2.1.1 Configuraciones Generales

En esta pestaña se configurarán los valores de interés para el cálculo general de resultados; como por ejemplo: densidad del aire, velocidad del sonido, presión de referencia, etc. En la Figura 3.12 se muestra el diseño del formulario que incluye esta pestaña.

Figura 3.12: Formulario de configuraciones generales.

### 3.3.2.1.2 Configuración de rango de frecuencias y conexiones del altavoz

Este formulario le permitirá al usuario configurar el voltaje y la polaridad de la fuente, el rango de frecuencias y, en caso desee trabajar con más de una unidad de altavoces, indicar el tipo de conexión eléctrica y configuración. En la Figura 3.13 se observa el diseño del formulario correspondiente a esta etapa.

The screenshot shows a window titled 'Configuraciones' with three tabs: 'General', 'Rango de frecuencias SPK', and 'Gráfica'. The 'Rango de frecuencias SPK' tab is active. At the top, there is a dropdown menu for 'Speaker 1'. Below it, the 'Entrada' section includes a 'Voltaje (v):' field with the value '2.83', a checked '1 w' checkbox, and an unchecked 'Polaridad invertida' checkbox. The 'Frecuencia' section has a 'Paso:' field with '35', 'F. Mínima (Hz):' with '10', and 'F. Máxima (Hz):' with '550' and a checked 'Auto' checkbox. The 'Conexion' section has a 'Cantidad:' dropdown set to '1', radio buttons for 'Conexión en Serie' (selected) and 'Conexión en paralelo', and radio buttons for 'Configuración Standar' (selected) and 'Configuración Isobárica'. An 'Aplicar' button is at the bottom right.

Figura 3.13: Formulario de configuración de rango de frecuencias y tipo de conexión eléctrica.

### 3.3.2.1.3 Configuración de Gráficos

El formulario de esta pestaña le permitirá al usuario modificar las características de la ventana gráfico. En la Figura 3.14 se observa el diseño de este formulario.

The screenshot shows the same 'Configuraciones' window, but with the 'Gráfica' tab active. The dropdown menu is set to 'Via 1'. The 'Escala' section has checked boxes for 'Mostrar etiquetas', 'Mostrar escala', and 'Log', and an unchecked 'Autoescala' checkbox. There are input fields for 'Máximo' and 'Mínimo'. The 'Estilo' section has checked boxes for 'Mayor tick', 'Mayor grid', and 'Menor grid', and unchecked boxes for 'Menor Tick' and 'Leyenda'. The 'Color, tamaño y tipo' section has color swatches and input fields for 'Linea' (value 2), 'Mayor Grid' (value 1), and 'Menor Grid' (value 1), along with dropdown menus for line style and 'BG Color'.

Figura 3.14: Formulario de configuración de las características del gráfico.

### 3.3.2.2 Formulario Via

En este formulario se visualizarán las etapas de cada vía, en donde cada cuadro es un control que activa o desactiva los elementos de la misma. En la Figura 3.15 se muestra el diseño de este formulario.



Figura 3.15: Formulario vía.

### 3.3.2.3 Formulario del conjunto Altavoz-Gabinete

En este formulario se ingresarán los datos del altavoz y del gabinete acústico. El diseño de este formulario se muestra en la Figura 3.16 y está vinculado con la clase “Speaker\_Box” (p. 46).

Figura 3.16: Diseño del formulario de ingreso de parámetros del conjunto Altavoz-Gabinete.

### 3.3.2.4 Formulario Gabinete

El usuario podrá ingresar el volumen del gabinete directamente utilizando el formulario expuesto en la Figura 3.16; pero también tendrá la posibilidad de obtener el valor del volumen a partir de las dimensiones de las aristas o calcular las dimensiones del gabinete a partir del volumen y un patron  $N$  ingresado por el diseñador. Es por ello, que se propone el diseño de otro formulario que involucra un cálculo más avanzado para obtener las dimensiones del gabinete, el cual es mostrado en la Figura 3.17.

Dimensiones Caja

Ancho Largo Altura

Ajustar dimensiones [  $2^{(N/3)}$  ]

N Largo: 0 Largo: 0.50 m

N Ancho: 1 Ancho: 0.50 m

N Altura: 2 Altura: 0.50 m

Ajustar dimensiones

Volumen : 0.07 m<sup>3</sup>

Aplicar Cancelar

Figura 3.17: Formulario de ingreso de dimensiones del gabinete.

### 3.3.2.5 Formulario Circuito

Este diseño servirá para la implementación de todos los formularios correspondientes a cada una de las etapas de la red de cruce, por lo que está directamente relacionado con la clase “Circuito” (p. 47). El diseño de este formulario se observa en la Figura 3.18

### 3.3.2.6 Formulario Gráfica

En este formulario se mostrarán las gráficas con los resultados de la simulaciones, se contempla en el diseño la ubicación de una barra de herramientas para la interacción con el usuario. En la Figura 3.19 se observa el diseño de este formulario.

**Tipo de circuito**

Carga Impedancia

Componentes

Modificar manualmente

**Parámetros del circuito**

**Diagrama de circuito**

**Valores de componentes del circuito**

**Gráfica de Función de transferencia**

Figura 3.18: Diseño del formulario de ingreso de parámetros de la red de cruce.

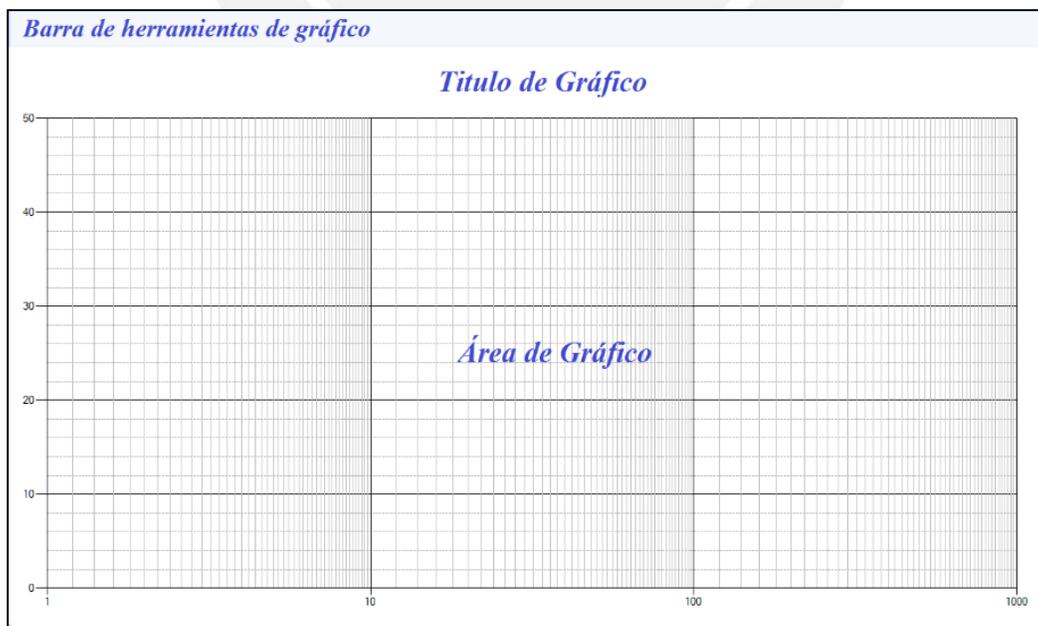


Figura 3.19: Diseño del formulario Gráfico.

### 3.3.2.7 Formulario principal

El formulario principal heredará y controlará todos los formularios presentados hasta el momento. Este formulario le permitirá al usuario interactuar con cada una de las etapas de las vias y observar los resultados de las simulaciones. El diseño del formulario principal se presenta en la Figura 3.20.

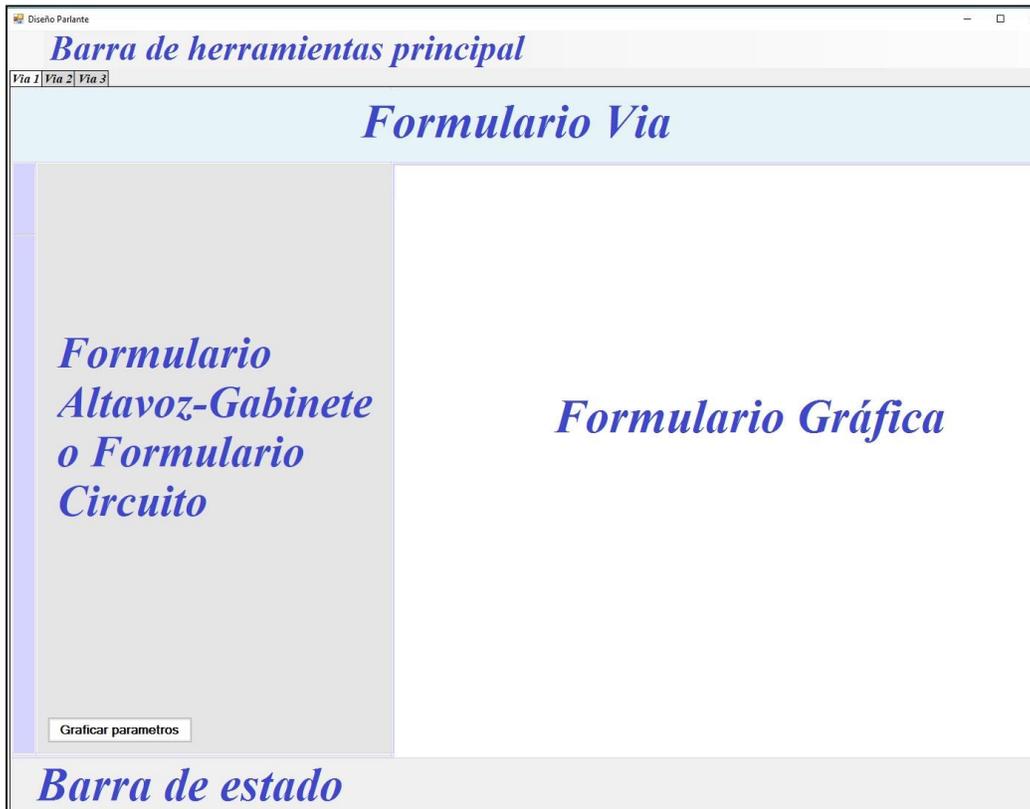


Figura 3.20: Formulario principal.

### 3.4 Programación

Una vez diseñadas las clases y los formularios del sistema, se procede a desarrollar los algoritmos que describen el software; para ello, se muestran los principales diagramas de flujo en los que se basan los códigos del programa.

#### 3.4.1 Diagrama de flujo principal

El diagrama de flujo principal, mostrado en la Figura 3.21, describe como se inicializa el programa.

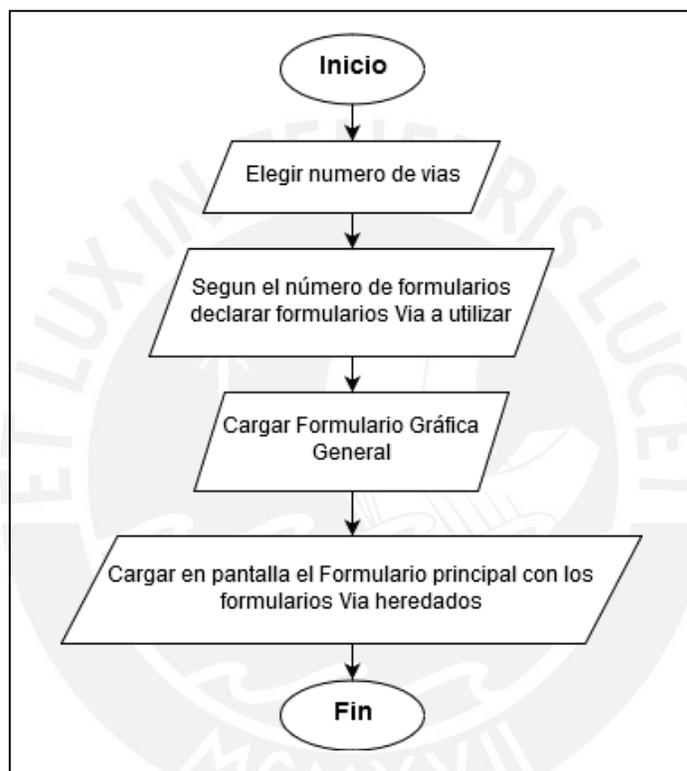


Figura 3.21: Diagrama de flujo principal.

### 3.4.2 Diagrama de flujo del conjunto Altavoz-Gabinete

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.22 describe los pasos para realizar las gráficas con los resultados individuales del altavoz-Gabinete.

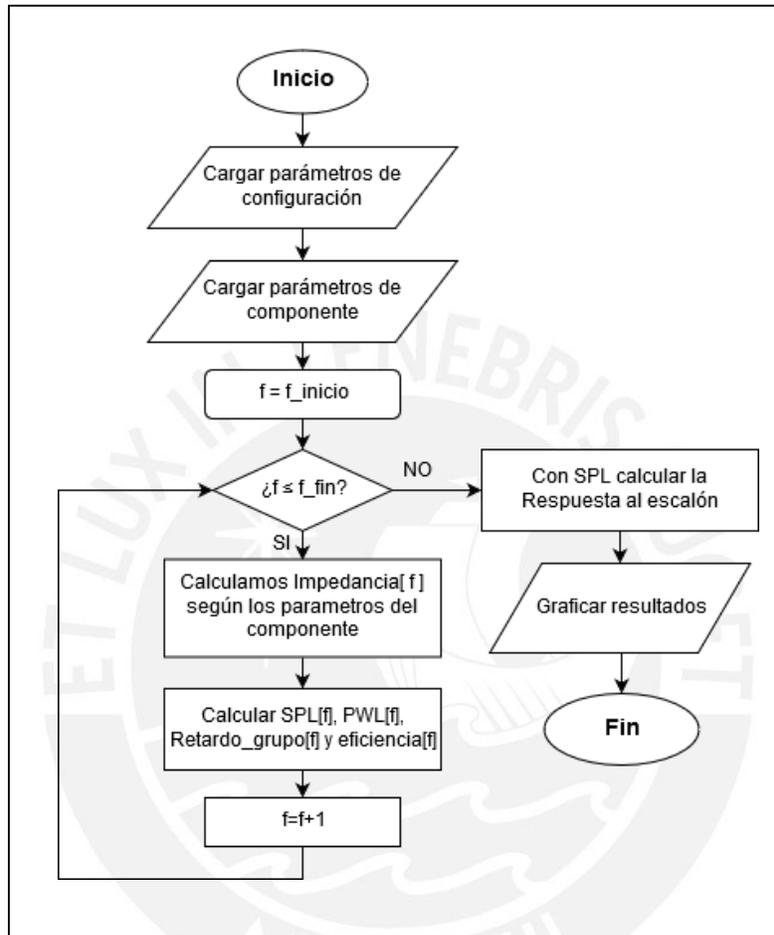


Figura 3.22: Diagrama de flujo del bloque Speaker

### 3.4.3 Diagrama de flujo del circuito pasivo

En la Figura 3.23 se muestra el diagrama de flujo con la descripción de los pasos para graficar los resultados individuales de cada una de las etapas de la red de cruce.

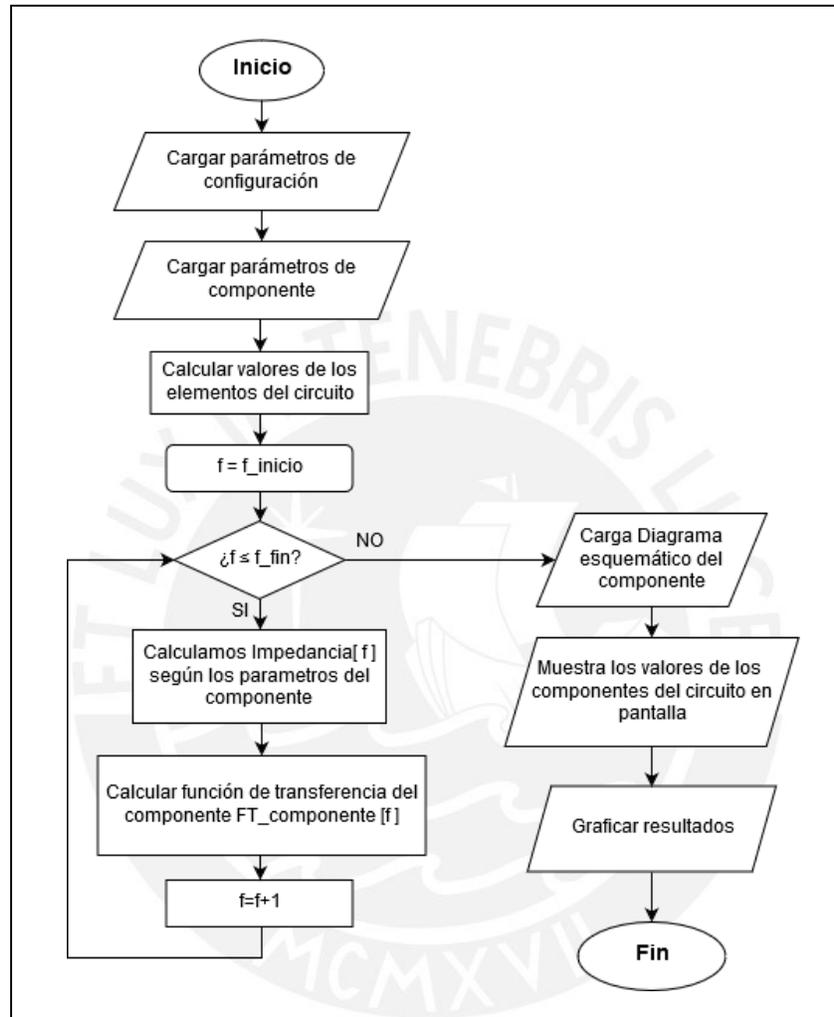


Figura 3.23: Diagrama de flujo para obtener la impedancia y función de transferencia del circuito de una red de cruce.

### 3.4.4 Diagrama resultado de vía

En la Figura 3.24: Diagrama de flujo para obtener el resultado de la vía. se muestra el diagrama de flujo con las descripción de los pasos realizados para obtener la gráfica con los resultados de cada vía.

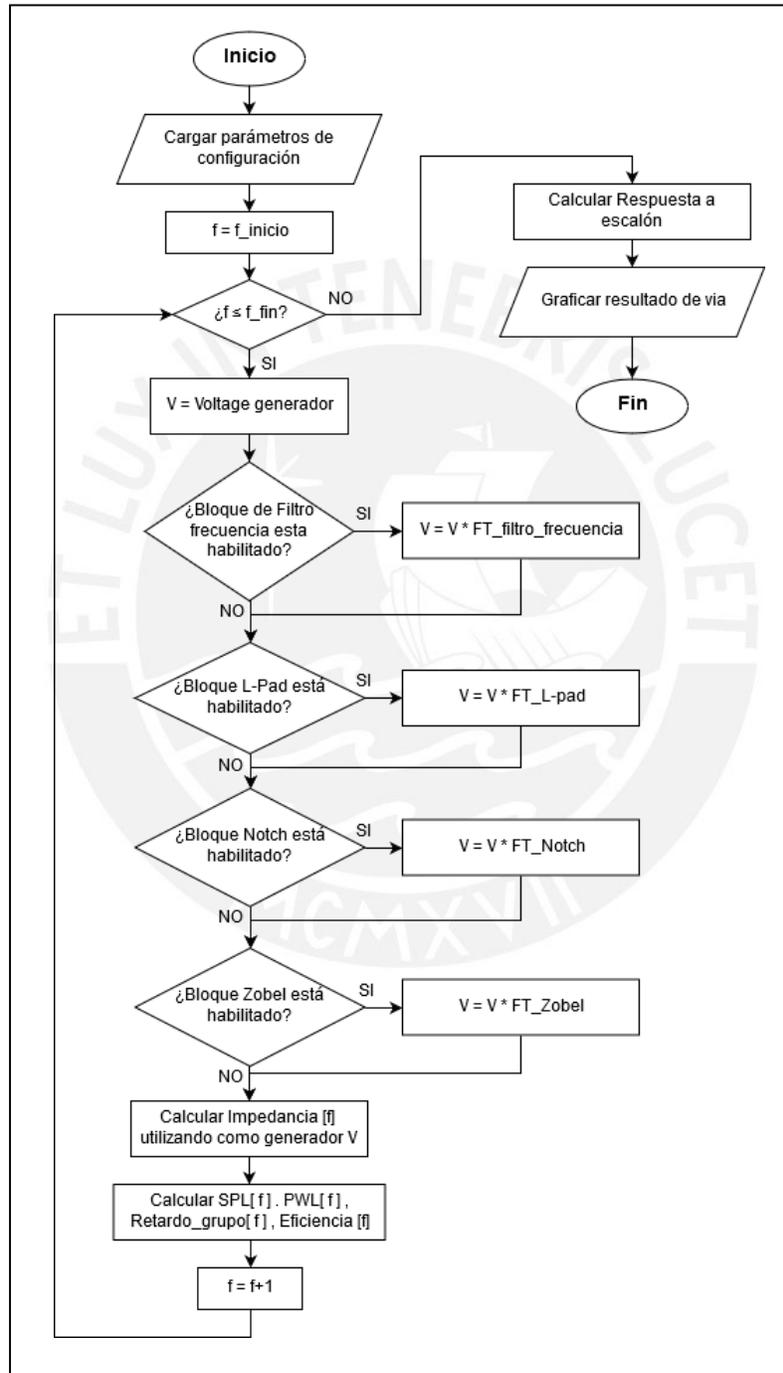


Figura 3.24: Diagrama de flujo para obtener el resultado de la vía.

### 3.4.5 Diagrama resultado general

A continuación, en la Figura 3.25 se expone el diagrama de flujo con los pasos para obtener los resultados generales del sistema de vías

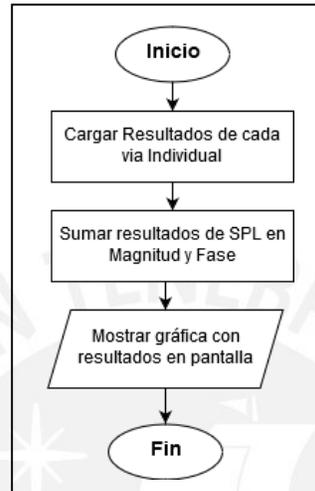


Figura 3.25: Diagrama de flujo para obtener el resultado del sistema de vías.

### 3.4.6 Lenguaje de programación

Para la implementación de estos algoritmos, se propone utilizar el lenguaje de programación Visual Basic en la plataforma de Visual Studio Community 2017. Esta plataforma está diseñada para trabajar adecuadamente en los sistemas operativos de Windows actuales, es gratuita y cuenta con una amplia documentación en la red; además, permite integrar, en un solo ambiente de trabajo, el diseño e implementación de las clases y formularios propuestos en este capítulo. (Microsoft, 2019)

Se plantea también, implementar las funciones básicas con las que operará el software (operaciones con números complejos, derivadas, transformadas, etc.) y el diseño de los controles de los formularios (botones, etiquetas, imágenes, marcos, etc.); esto traerá consigo una carga de trabajo adicional, pero permitirá alcanzar un software independiente y no será necesaria la instalación de otros programas o drivers que no sean propios del sistema operativo Windows 10.

# CAPÍTULO 4

## PRESENTACIÓN DEL SOFTWARE Y SUS RESULTADOS

En este capítulo se presenta el software implementado, así como algunos resultados de su funcionamiento.

### 3.5 Presentación del software

En la Figura 4.1: Ventana principal se observa la ventana principal del software, en donde se aprecian los diferentes formularios para el ingreso y salida de datos.

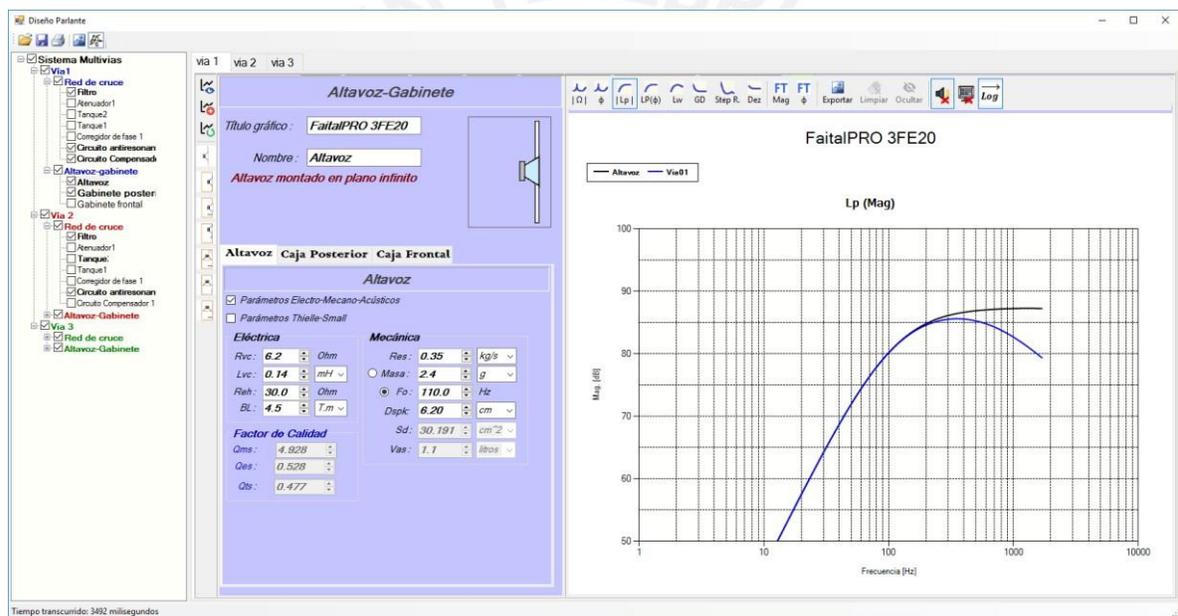


Figura 4.1: Ventana principal

#### 3.5.1 Ventana de navegación

Desde esta ventana se accede a los diferentes formularios y también nos da la posibilidad de activar o desactivar cada uno de los circuitos de la red de cruce. En la Figura 4.2 se observa la implementación de esta ventana.

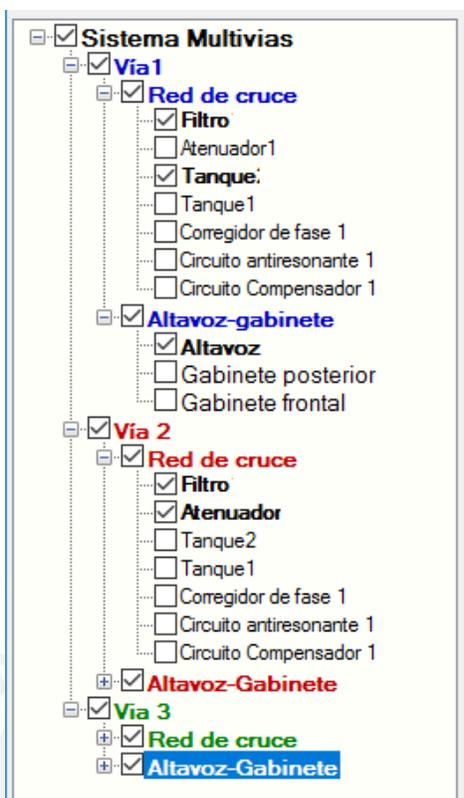


Figura 4.2: Ventana de navegación

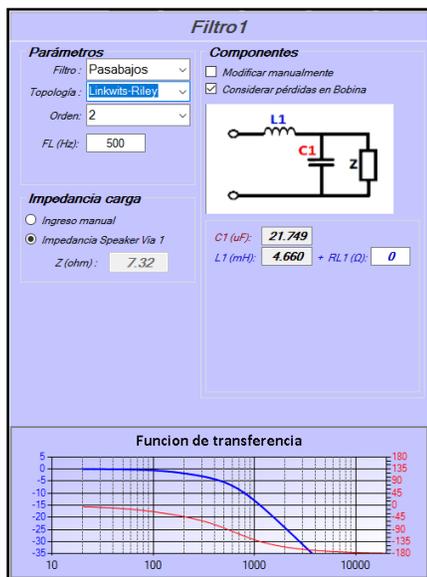
### 3.5.2 Ingreso de parámetros Altavoz-Gabinete

En la Figura 4.3 se muestra el formulario Altavoz-Gabinete, cuya implementación considero el diseño expuesto en la Figura 3.16 (p. 50).

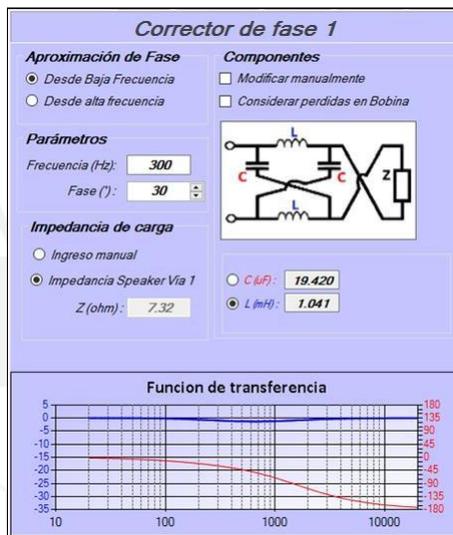
Figura 4.3: (a) Ventana de ingreso de parámetros de Altavoz. (b) Ventana de ingreso de parámetros de Gabinete

### 3.5.3 Ingreso de parámetros de las redes de cruce

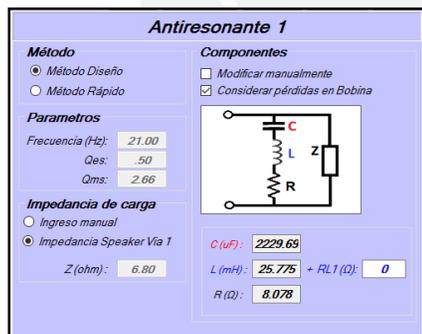
En la Figura 4.4 se muestran los formularios correspondientes a cada una de las etapas de la red de cruce; en estas ventanas se ingresan los parámetros del circuito y se muestran los resultados del circuito en pantalla. Para la implementación de estos formularios se tomó en cuenta el diseño presentado en la Figura 3.18 (p. 51).



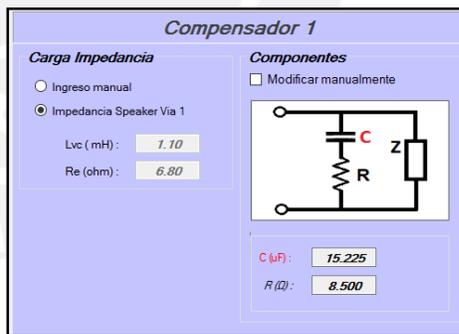
(a)



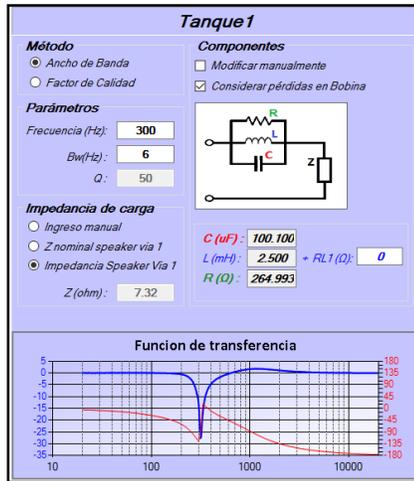
(b)



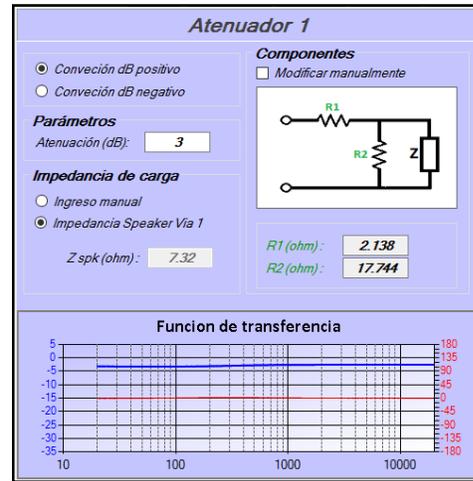
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.4 Ventanas para ingreso de parámetros de la Red de cruce. (a) Ventana Filtro. (b) Ventana Circuito Corrector de fase (c) Ventana Filtro antiresonante. (d) Ventana circuito compensador de efecto inductivo. (e) Ventana Circuito Tanque. (f) Ventana Atenuador L-Pad.

### 3.5.4 Ventana gráfico

En esta ventana se muestran las gráficas con los resultados de la simulación. Considerando el diseño mostrado en la Figura 3.19 (p. 51), cuenta con una barra de herramientas con botones que permiten la selección del tipo de gráfico que se desea visualizar. En la Figura 4.5 se observa el formulario implementado.

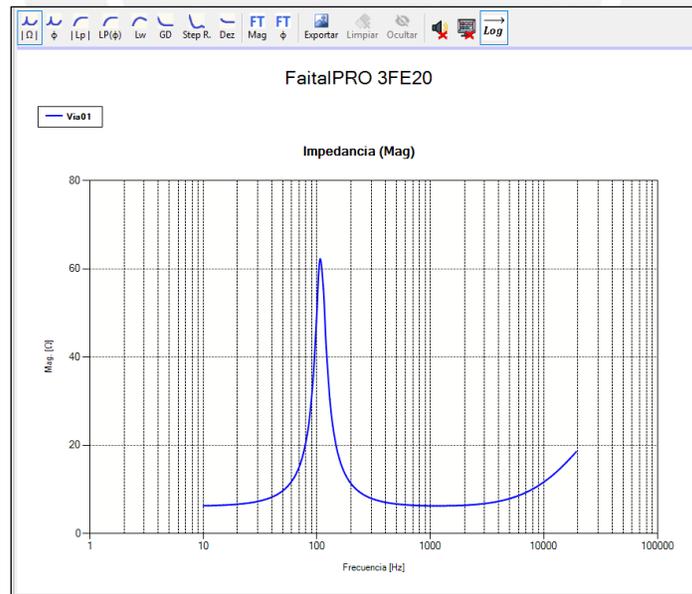


Figura 4.5: Ventana Gráfico

### 3.5.5 Barras de herramientas

El software cuenta con distintas barras de herramientas que hacen más amigable la interacción con el usuario permitiéndole trabajar con diferentes ventanas a la vez. En la Figura 4.6 se muestra las ubicaciones de las barras de herramientas dentro de la ventana principal.

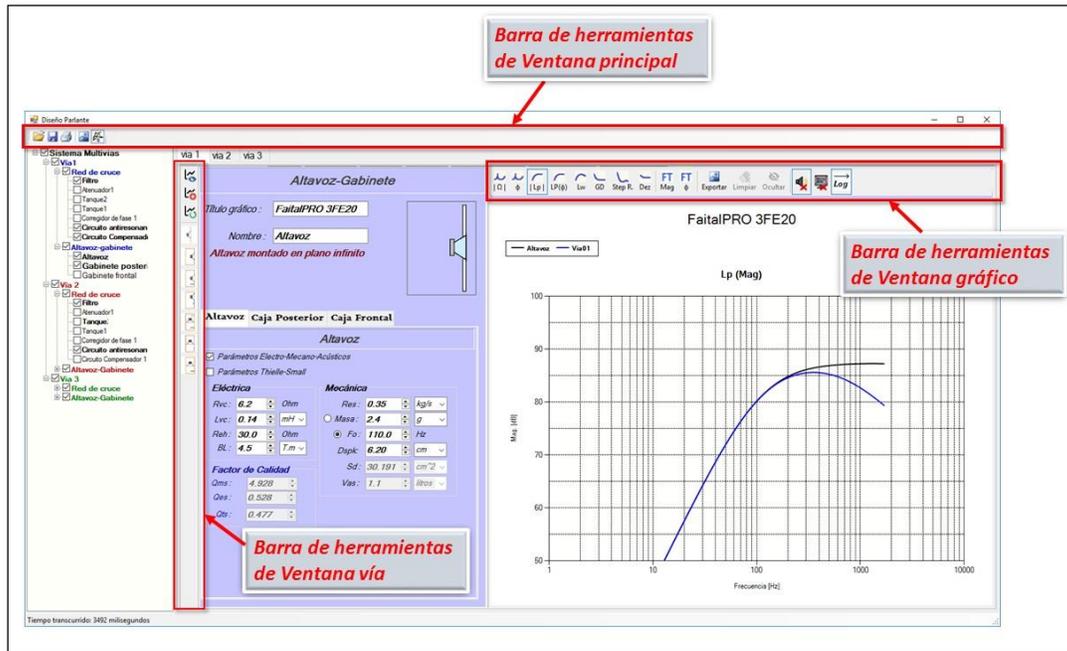


Figura 4.6: Ubicación de las barras de herramientas en la ventana principal

#### 3.5.5.1 Barra de herramientas de la ventana principal

En esta barra de herramientas se interactúa con el sistema general permitiendo:

- Abrir y guardar no solo los parámetros ingresados en el sistema de vías, sino también el valor de los resultados obtenidos de las simulaciones (1 y 2 en Figura 4.7).
- Graficar el resultado general del sistema de vías (3 en Figura 4.7).
- Ejecutar software externo que pueda ser de interés para el diseñador de altavoces (4 en Figura 4.7).



(a)

- 1  Abrir parámetros.
- 2  Guardar parámetros.
- 3  Grafica general del sistema de vías.
- 4  Abrir software externo.

(b)

Figura 4.7: Descripción de la barra de herramientas de ventana principal

### 3.5.5.2 Barra de herramientas de ventana vía

Permite interactuar con cada vía de forma individual de la siguiente manera:

- Mostrar en pantalla graficas previas de los parámetros ingresados (1 en Figura 4.8)
- Mostrar graficas de forma acumulada para que el usuario pueda apreciar el efecto de la variación de parámetros entrada en sus resultados. (2 en Figura 4.8)
- Actualizar y graficar los resultados de la simulación en la vía. (3 en Figura 4.8)
- Elegir el tipo de montaje para el altavoz seleccionados a través de una serie de atajos que activan y desactivan casillas según el montaje seleccionado. (4 a 10 en Figura 4.8)



- 1  Vista previa.
- 2  Gráfica acumulativa.
- 3  Gráfica principal.
- 4  Plano infinito.
- 5  Gabinete acústico cerrado.
- 6  Gabinete con reflector de bajos.
- 7  Gabinete con radiador pasivo.
- 8  Pasabanda de una cámara con ducto.
- 9  Pasabanda de dos cámaras con ducto.
- 10  Pasabanda de dos cámaras con radiador pasivo.

(a)

(b)

Figura 4.8: Descripción de la barra de herramientas de ventana vías.

### 3.5.5.3 Barra de herramientas de la ventana gráfico

Esta barra de herramientas interactúa con la ventana de gráficos, permitiéndole al usuario:

- Elegir el tipo de grafica que desea visualizar en pantalla (1 a 10 en Figura 4.9)
- Exportar las imágenes de los resultados de la vía en formato PNG. (11 en Figura 4.9)
- Borrar u ocultar gráficas acumuladas. (12 y 13 en Figura 4.9)
- Agregar a los resultados de la vía, la gráfica del altavoz sin red de cruce (14 en Figura 4.9)
- Elegir si se observa uno o más gráficos a la vez en la ventana (15 en Figura 4.9)
- Elegir entre escala logarítmica o lineal (16 en Figura 4.9)



(a)

- |   |  |  |    |  |   |
|---|--|--|----|--|---|
| 1 |  | Magnitud de la impedancia.               | 9  |  | Magnitud de la función de transferencia de la red de cruce. |
| 2 |  | Fase de la impedancia.                   | 10 |  | Fase de la función de transferencia de la red de cruce.     |
| 3 |  | Magnitud del nivel de presión sonora.    | 11 |  | Exportar gráficas.  |
| 4 |  | Fase del nivel de presión sonora.        | 12 |  | Borrar graficas.  |
| 5 |  | Magnitud del nivel de potencia acústica. | 13 |  | Ocultar gráficas.   |
| 6 |  | Retardo de grupo.                        | 14 |  | Gráfica de altavoz sin red de cruce.                        |
| 7 |  | Respuesta al escalón unitario.           | 15 |  | Mostrar varios gráficos a la vez.                           |
| 8 |  | Desplazamiento de la Bobina.             | 16 |  | Escala de frecuencia logarítmica.                           |

(b)

Figura 4.9: Descripción de la barra de herramientas de ventana gráfico.

### 3.6 Uso del software para el análisis del comportamiento de las variables

Se usará el software para graficar el comportamiento del altavoz **JBL 2235H** según la variación de una de sus variables. En la Tabla 4.1 se observan los parámetros Thiele-Small extraídos de la hoja de datos del altavoz.

Rango de frecuencia:	20 Hz to 2 kHz
Máxima frecuencia de cruce recomendada :	1000 Hz
Volumen de gabinete recomendado:	De 85 a 285 L (de 3 a 10 ft <sup>3</sup> )
Diámetro efectivo del pistón:	337 mm ( 13 1/4 in)
Factor BI :	20.5 N/A
<b>PARAMETROS THIELE - SMALL</b>	
Fs:	20 Hz
Re:	6.0 ohms
Qts:	0.25
Qms:	2.5
Qes:	0.28
Vas:	460 L ( 16.2 ft <sup>3</sup> )
Sd:	0.089 m <sup>2</sup> ( 138 in <sup>2</sup> )
Le:	1.2 mH

Tabla 4.1: Características de Altavoz JBL 2235H

A continuación, se exponen las gráficas con los resultados obtenidos por el software de simulación de altavoces implementado en esta tesis.

### 3.6.1 Variación del factor de fuerza (BL)

En la Figura 4.10 se aprecian los resultados para diferentes valores de factor de fuerza (20.5, 15 y 25 T.m).

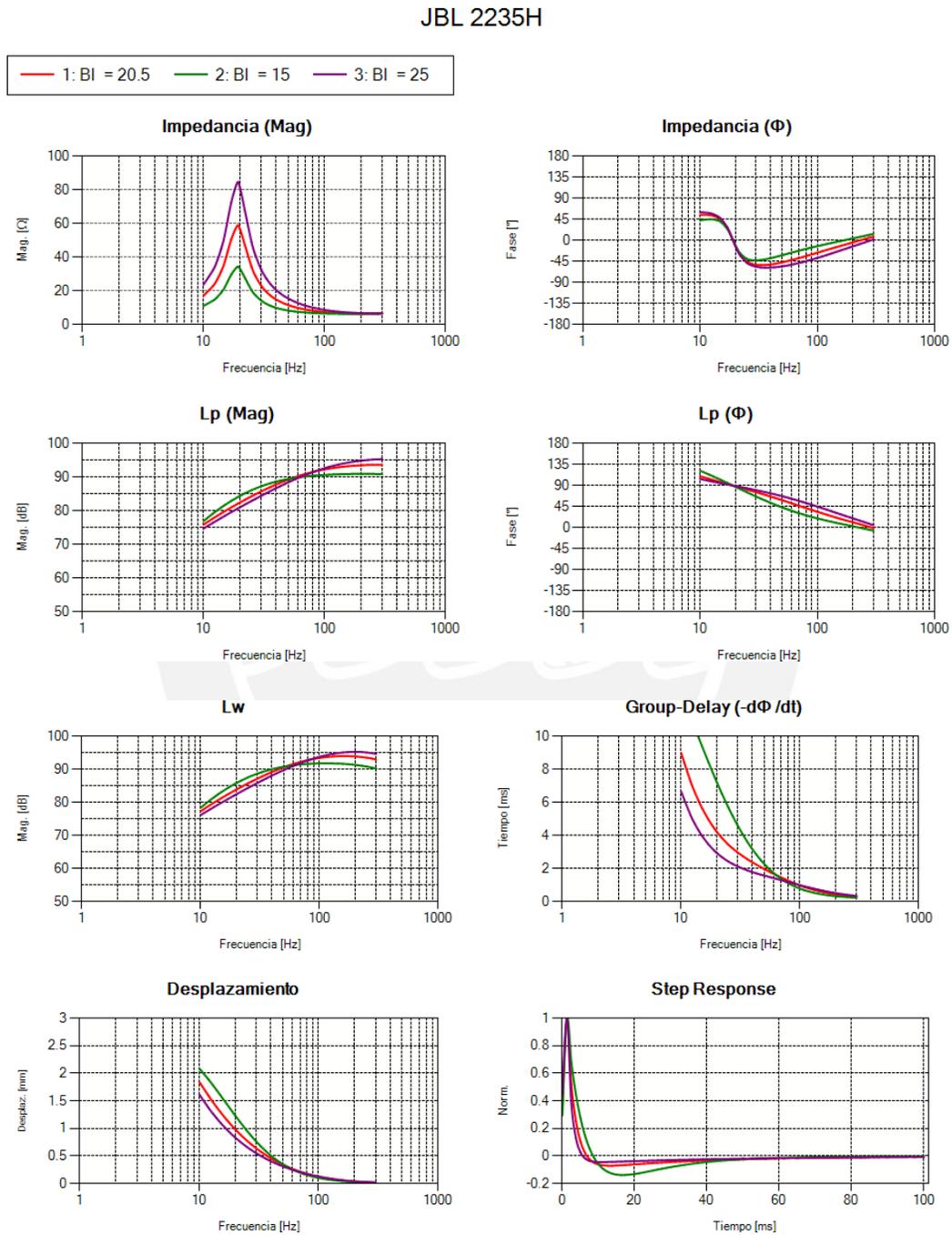


Figura 4.10: Resultado variación BL.

### 3.6.2 Variación de la masa mecánica

En la Figura 4.11 se aprecian los resultados al incrementar la masa mecánica del altavoz desde 140.5 g hasta 1 kg, este último valor es absurdo pero ayuda a exponer el comportamiento del altavoz ante un gran incremento de masa.

JBL 2235H

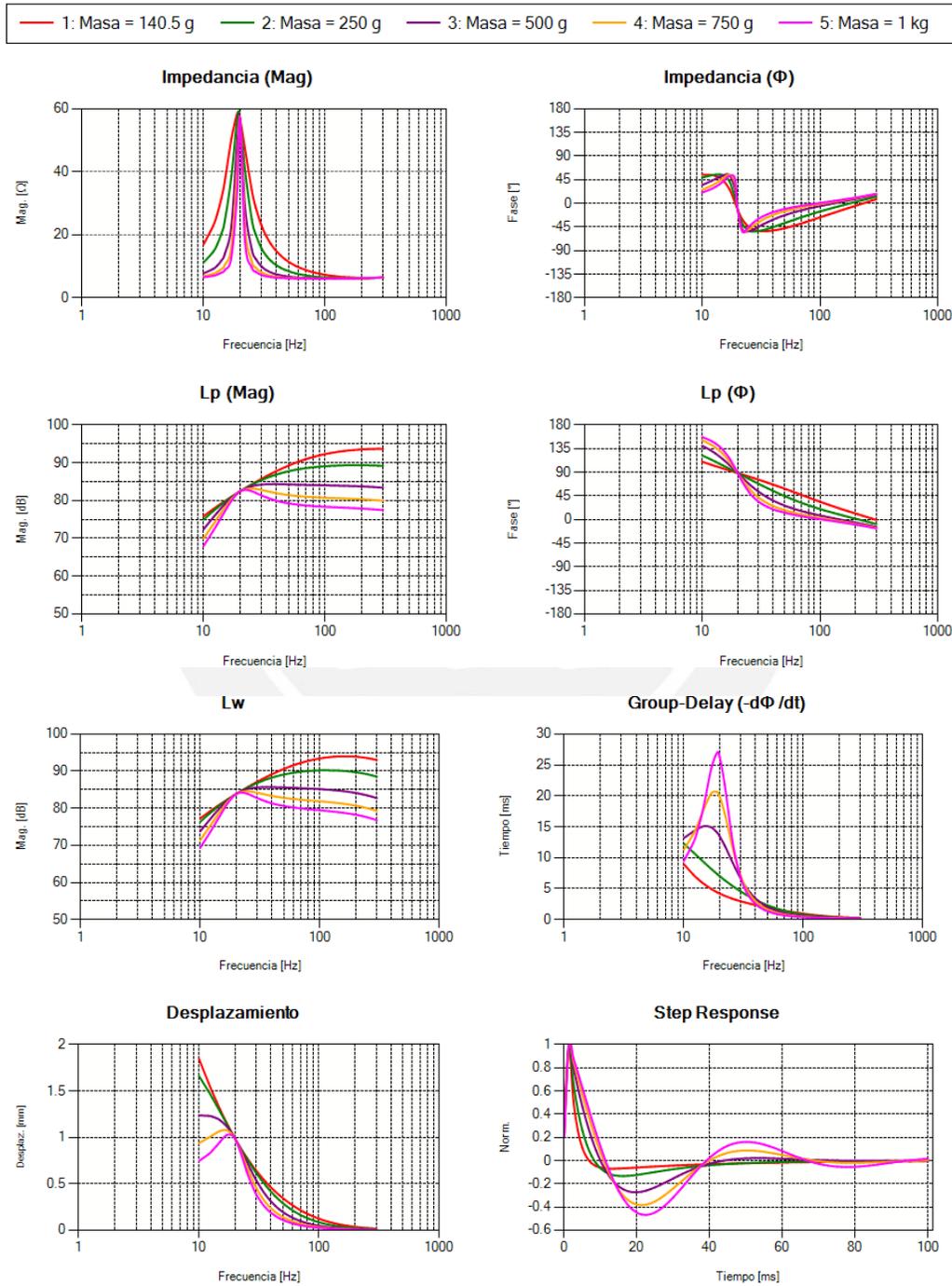


Figura 4.11: Resultado variación de masa.

### 3.6.3 Variación de la frecuencia de resonancia del altavoz

En la Figura 4.12 se observa el comportamiento del altavoz ante la variación de su frecuencia de resonancia.

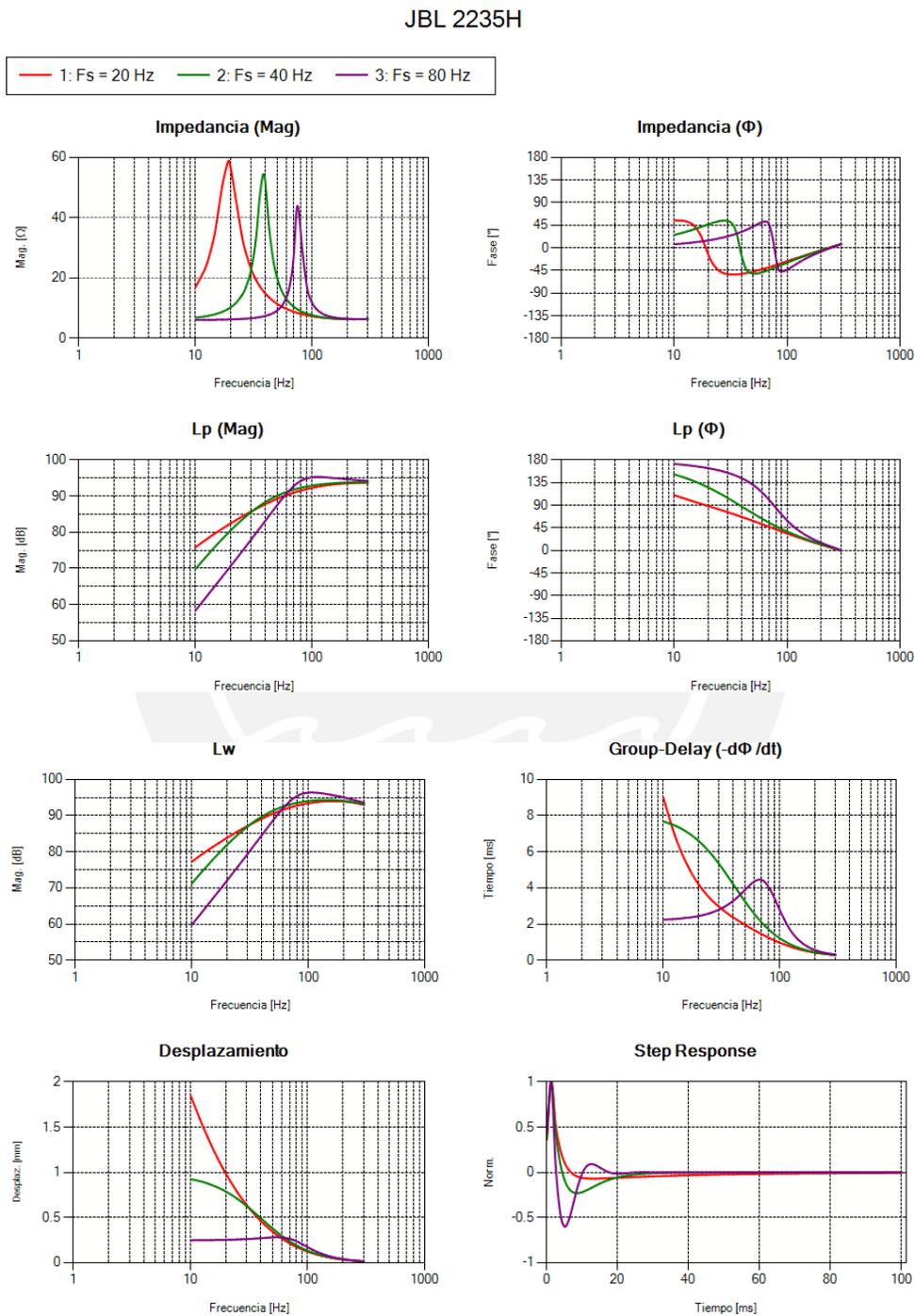


Figura 4.12: Resultado variación de la frecuencia de resonancia.

### 3.6.4 Variación del Volumen del gabinete acústico cerrado

En la Figura 4.13 se aprecian los diferentes resultados ante el incremento del volumen del gabinete acústico cerrado.

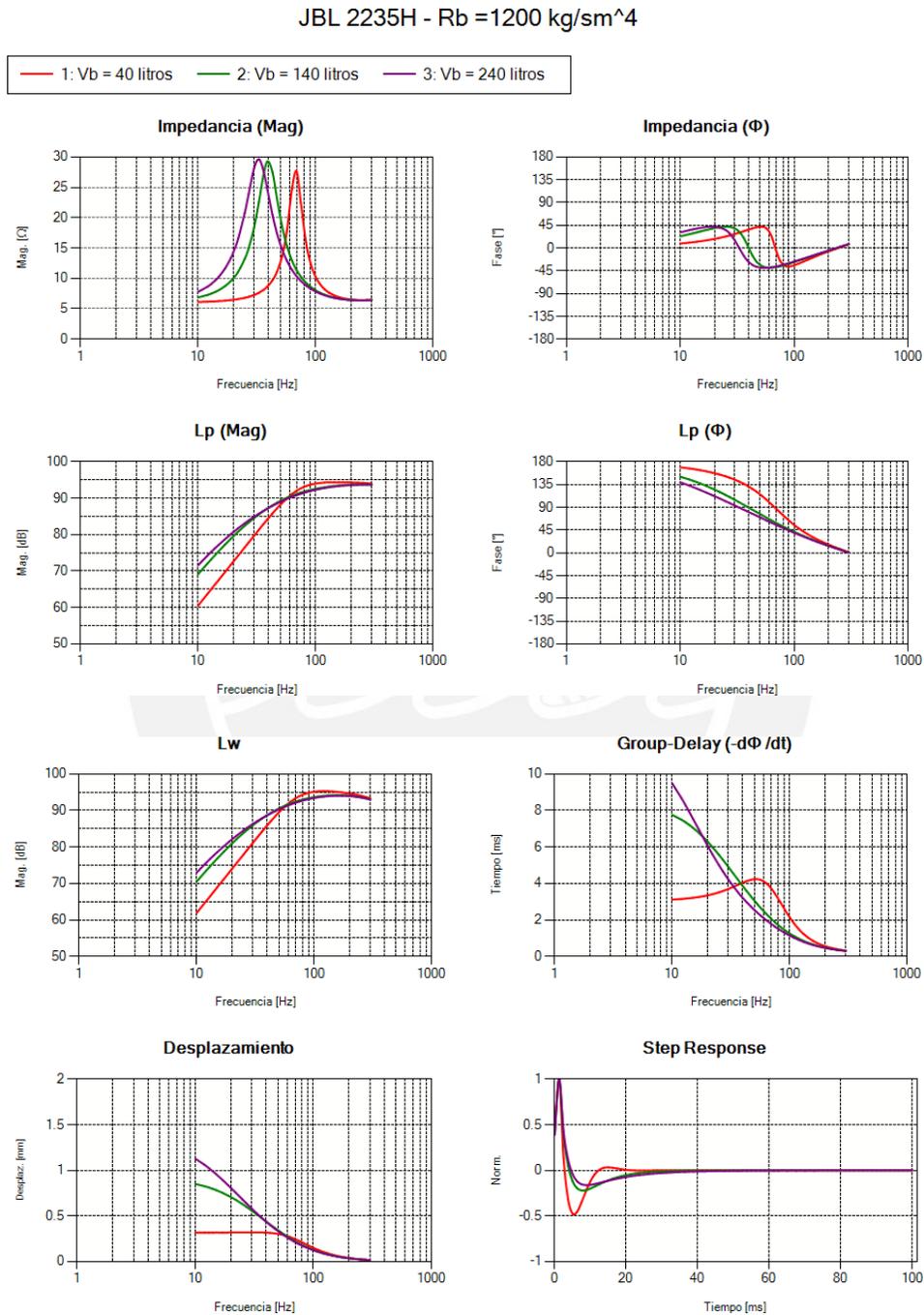


Figura 4.13: Resultado variación del volumen del gabinete.

### 3.6.5 Variación de la resistencia material absorbente en gabinete acústico cerrado

En la Figura 4.14 se aprecian los resultados de la variación de la resistencia acústica del material absorbente dentro del gabinete acústico cerrado.

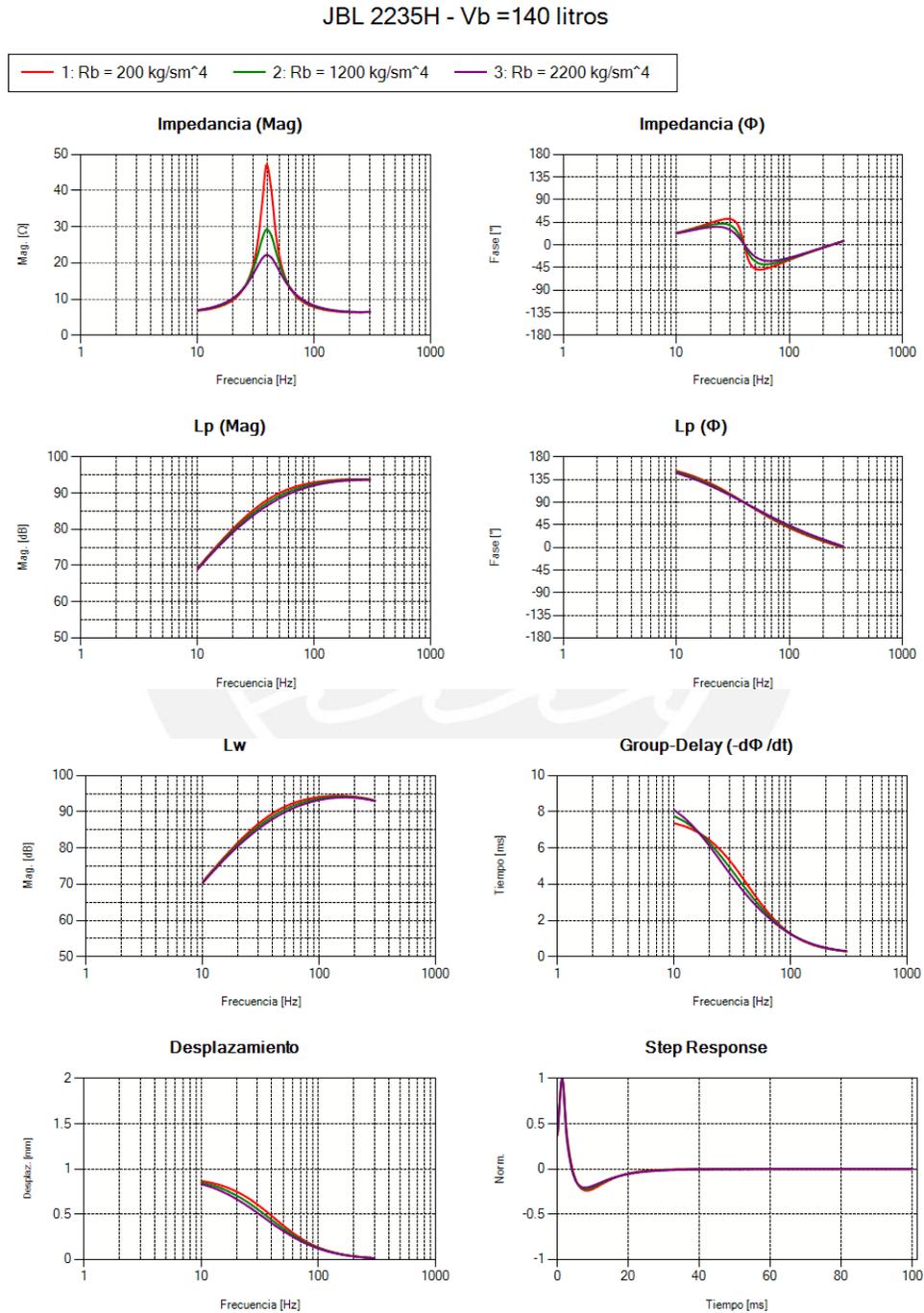


Figura 4.14: Resultado variación de la resistencia del material absorbente.

### 3.6.6 Variación de la Frecuencia de resonancia del ducto en un gabinete acústico con reflector de bajos

En la Figura 4.15 se observa el efecto en la respuesta del altavoz ante la variación de la frecuencia de resonancia del ducto.

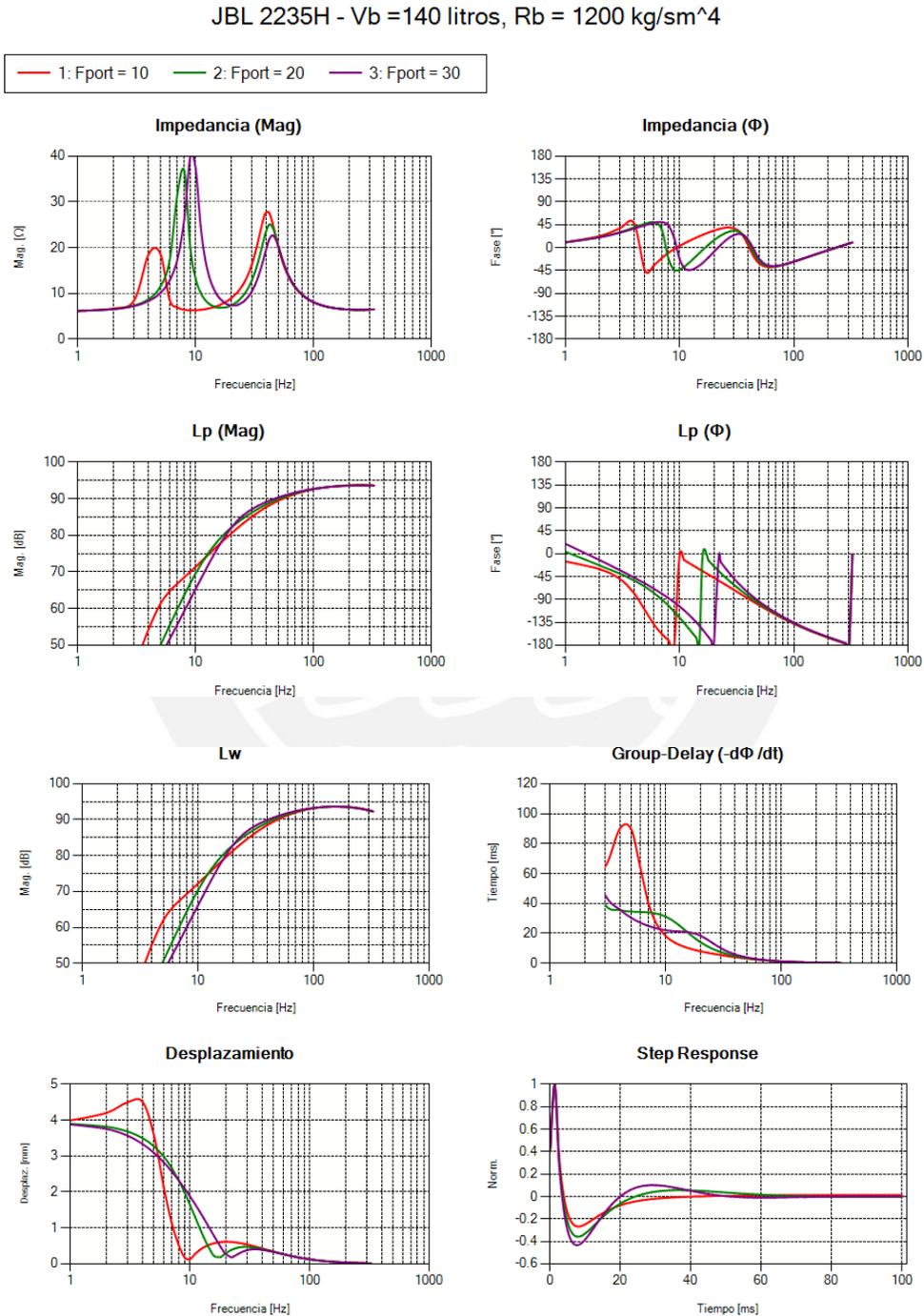


Figura 4.15: Resultado variación de la frecuencia de resonancia del ducto.

### 3.6.7 Variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje convencional

En la Figura 4.16 se observan las diferentes respuestas del altavoz ante la variación del tipo de conexión eléctrica en dos unidades de altavoces en montaje convencional.

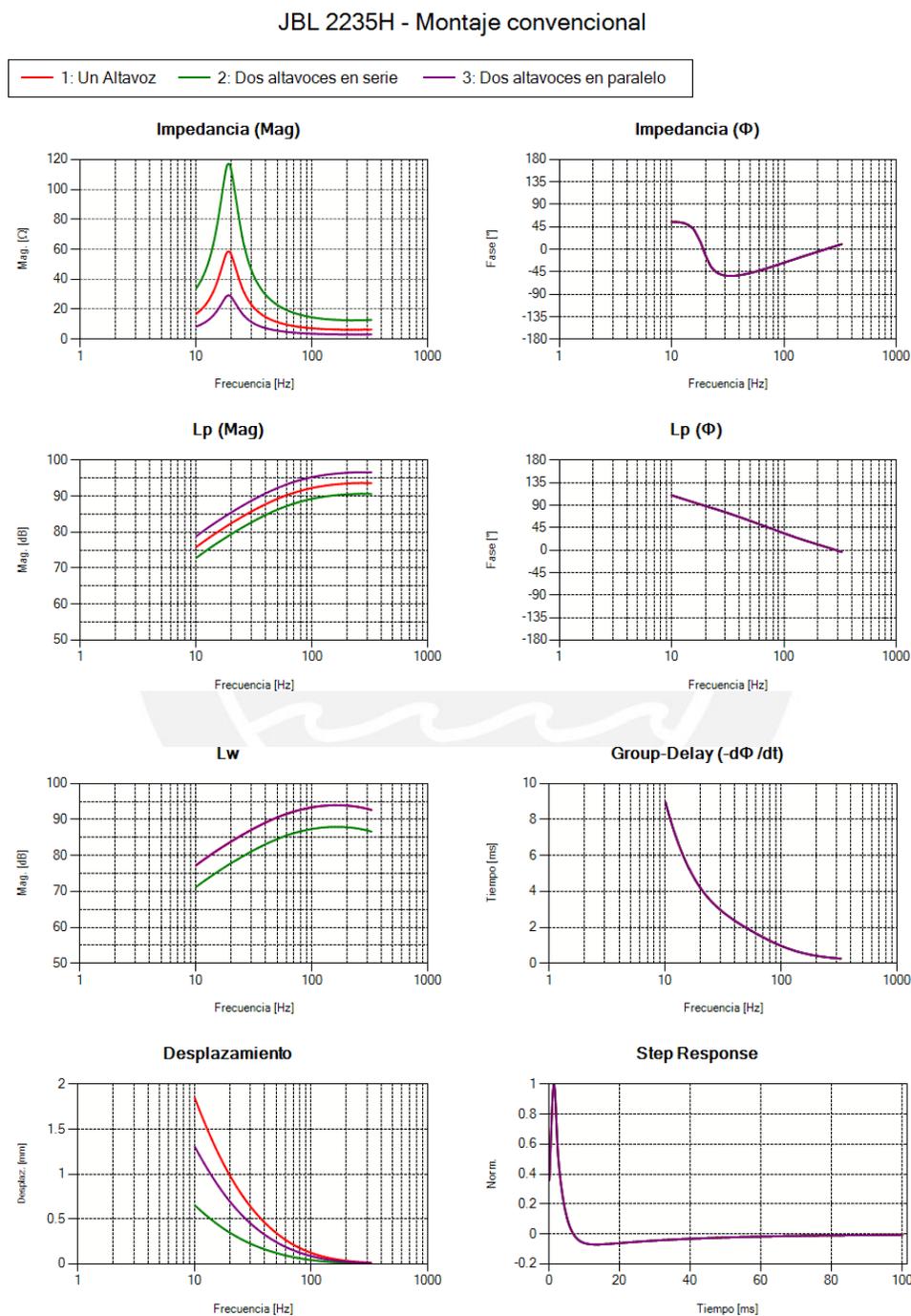


Figura 4.16: Resultados de la variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje convencional.

### 3.6.8 Variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje isobárico

En la Figura 4.17 se observan las diferentes respuestas del altavoz ante la variación del tipo de conexión eléctrica en dos unidades de altavoces en montaje isobárico.

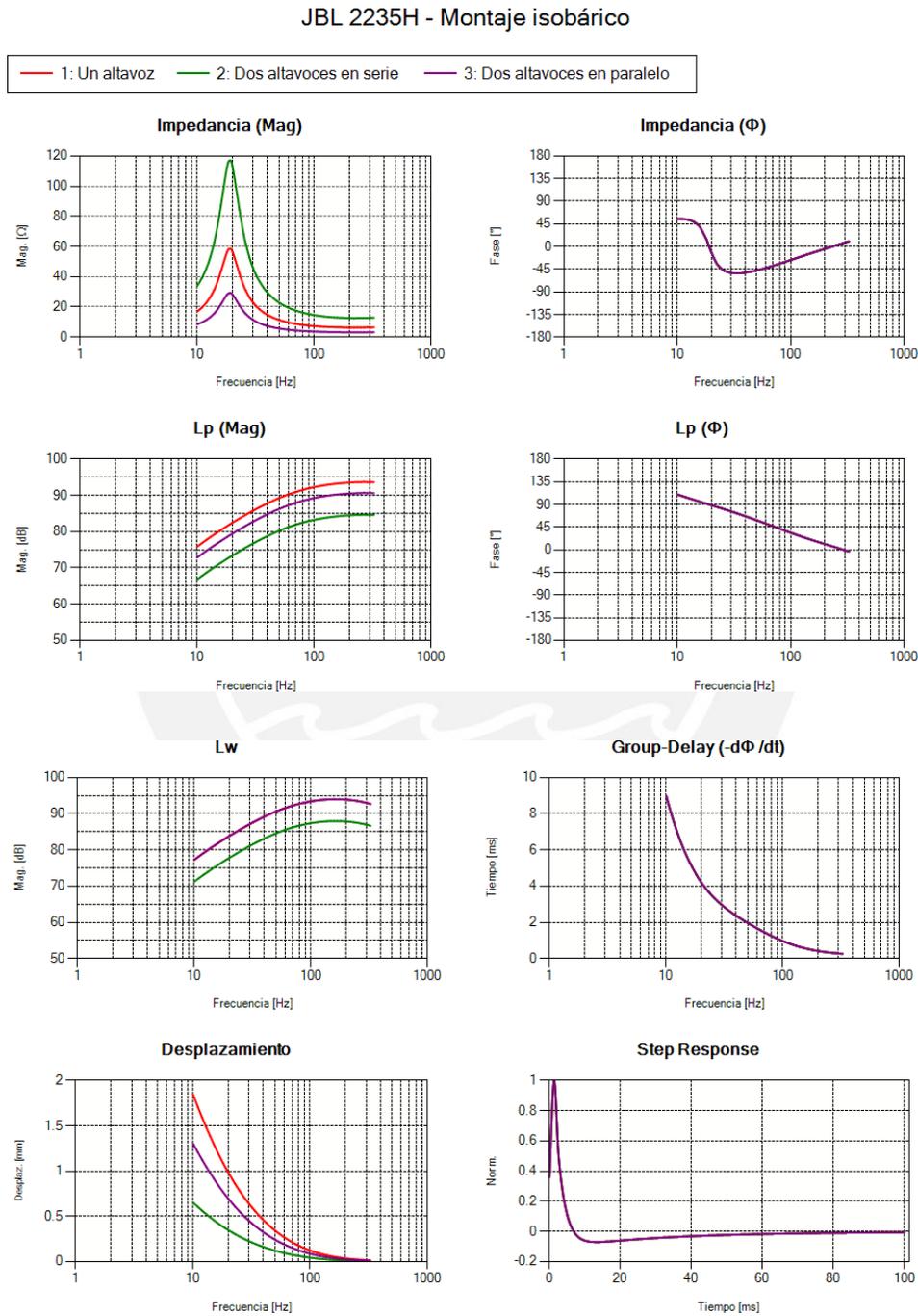


Figura 4.17: Resultados de la variación del tipo de conexión eléctrica entre dos unidades de altavoces en montaje isobárico.

### 3.7 Uso del software para diseñar la red de cruce pasiva en un altavoz de bajas frecuencias.

Para el diseño de este sistema se utilizó el altavoz FaitalPRO 3FE20, cuyos parámetros EMA, extraídos de sus hoja de datos, son presentados en la Tabla 4.2.

<b>Rango de frecuencia:</b>	100 Hz to 20 kHz
<b>Xmax:</b>	1.83 mm
<b>Factor Bl:</b>	4.5 N/A
<b>Fs:</b>	110 Hz
<b>Re:</b>	6.2 $\Omega$
<b>Le:</b>	0.15 mH
<b>Rms:</b>	0.35 Kg/s
<b>Mmd:</b>	2.4 g
<b>Sd:</b>	30.2 cm <sup>2</sup> (4.68 in <sup>2</sup> )

Tabla 4.2: Características de Altavoz FaitalPRO 3FE20

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada etapa del proceso de diseño.

#### 3.7.1 Altavoz montado en plano infinito

Utilizando los parámetros expuestos en la Tabla 4.2, se ingresan los datos del altavoz FaitalPRO 3FE20 en el software de diseño de altavoces. En la Figura 4.18 se muestra una captura de pantalla del software con los parámetros EMA ingresados.

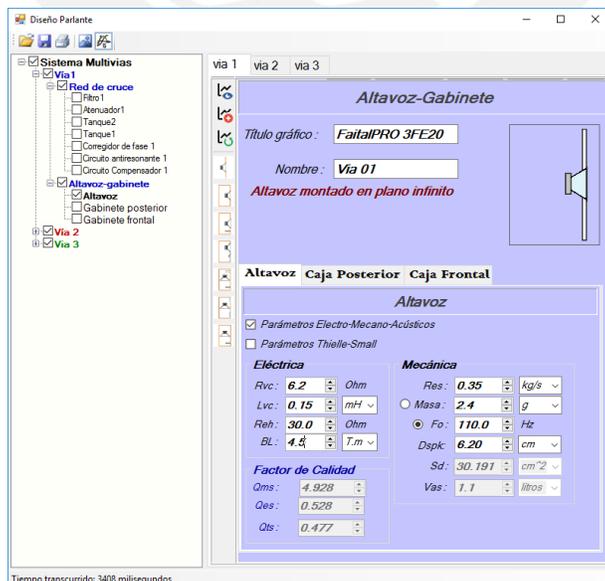


Figura 4.18: Captura de pantalla de Software de simulación. Los datos corresponden al altavoz FaitalPRO 3FE20.

En la Figura 4.19 se observan las gráficas con los resultados de la simulación producidos por el software.

### FaitalPRO 3FE20

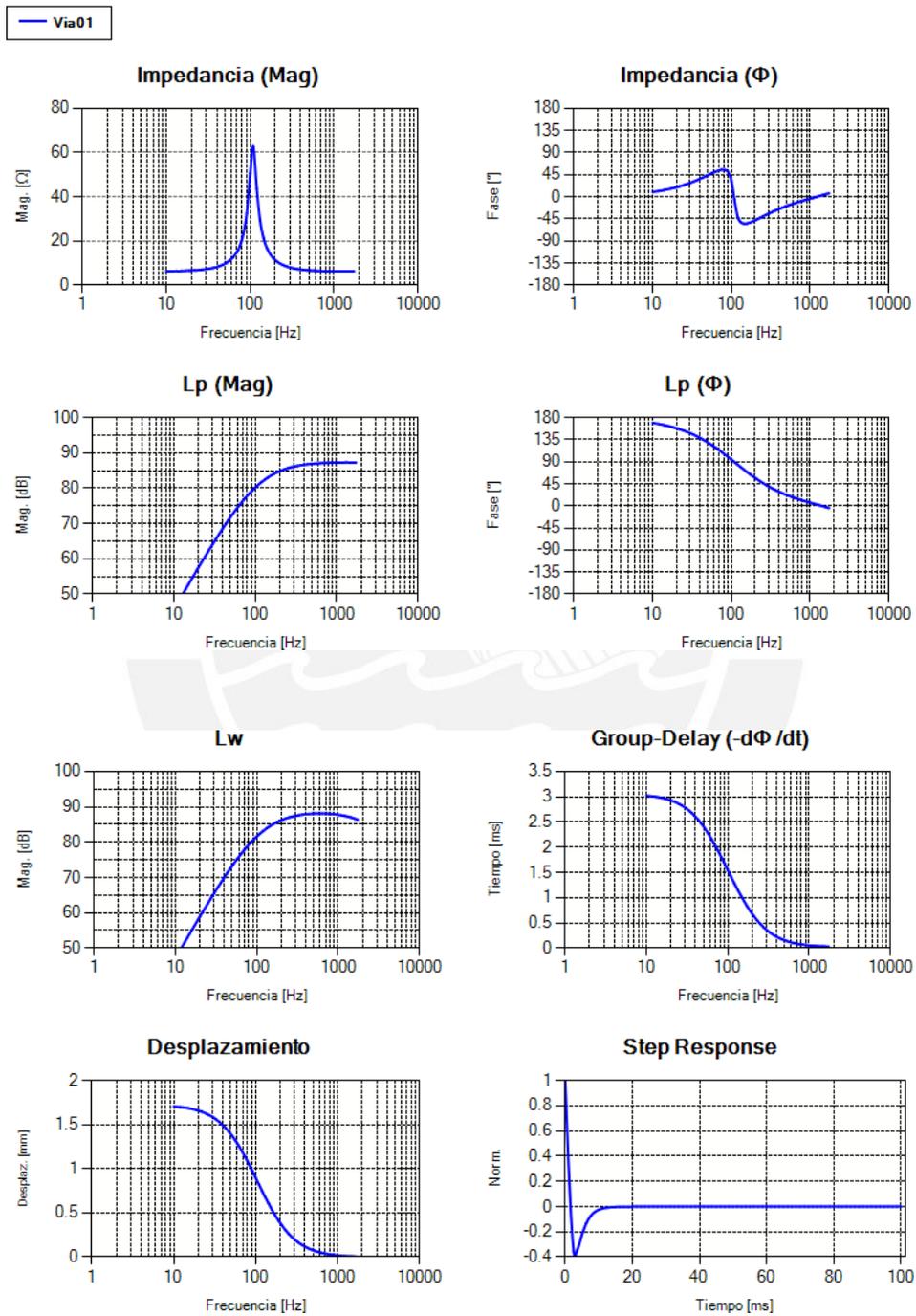


Figura 4.19: Resultado de simulación FaitalPRO 3FE20.

### 3.7.2 Corrección de impedancia de carga

El altavoz, al no tener una impedancia constante, puede afectar significativamente a la función transferencia del filtro pasivo que se desee utilizar, es por ello que se colocará un circuito compensador de efecto inductivo y un circuito antiresonante en paralelo con el mismo.

En la Figura 4.20 se muestra una captura de pantalla del uso del software para calcular el valor de los elementos del circuito compensador de efecto inductivo. Los efectos de agregar este circuito pueden observarse en la Figura 4.21, en donde se aprecia que, la impedancia tiende a ser resistiva y constante en la alta frecuencia.

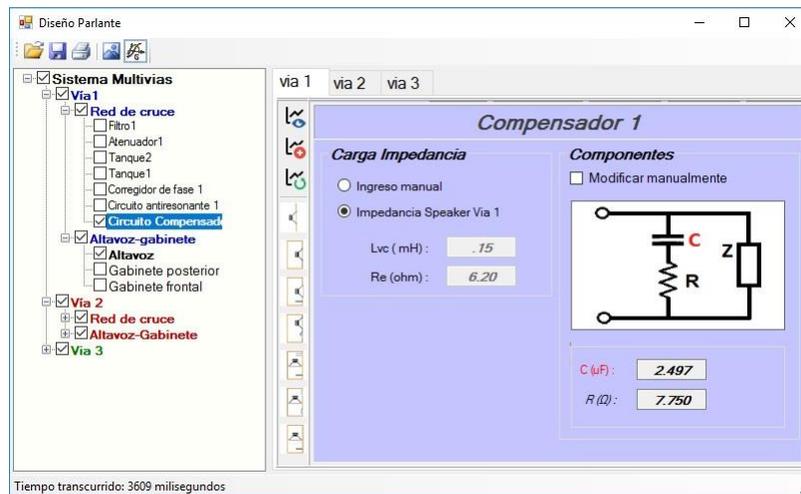


Figura 4.20: Captura de pantalla del software con los resultados del Circuito compensador de efecto inductivo.

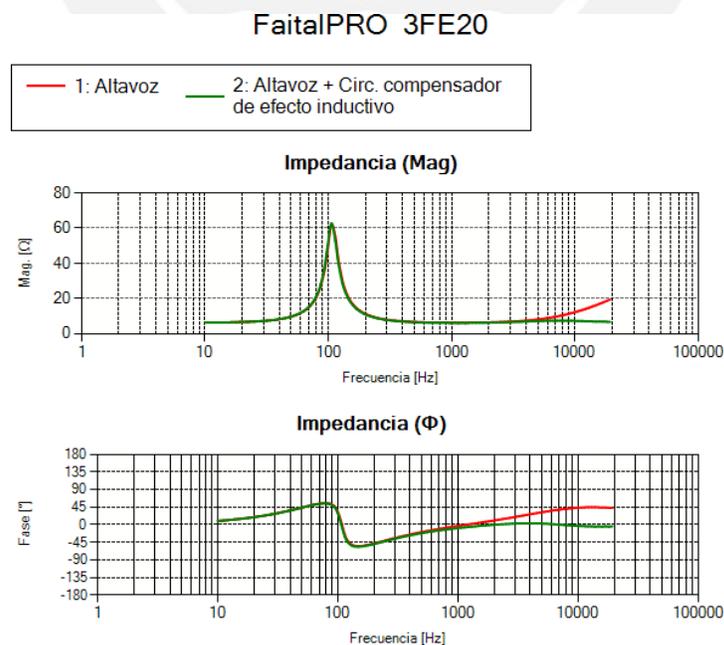


Figura 4.21: Gráfica de impedancia del altavoz con circuito compensador de efecto inductivo.

En la Figura 4.22 se observan los valores calculados para el circuito antiresonante; cuyos resultados se observan en la Figura 4.23, en donde se aprecia que se ha eliminado la resonancia del altavoz y en bajas frecuencias tiende a ser constante y resistivo puro.

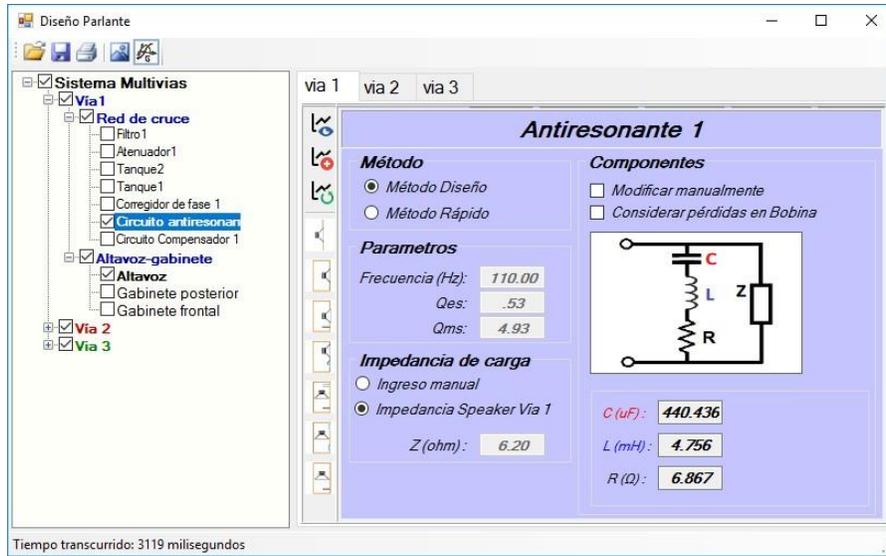


Figura 4.22: Captura de pantalla de software con los resultados del Circuito compensador de efecto inductivo.

### FaitalPRO 3FE20

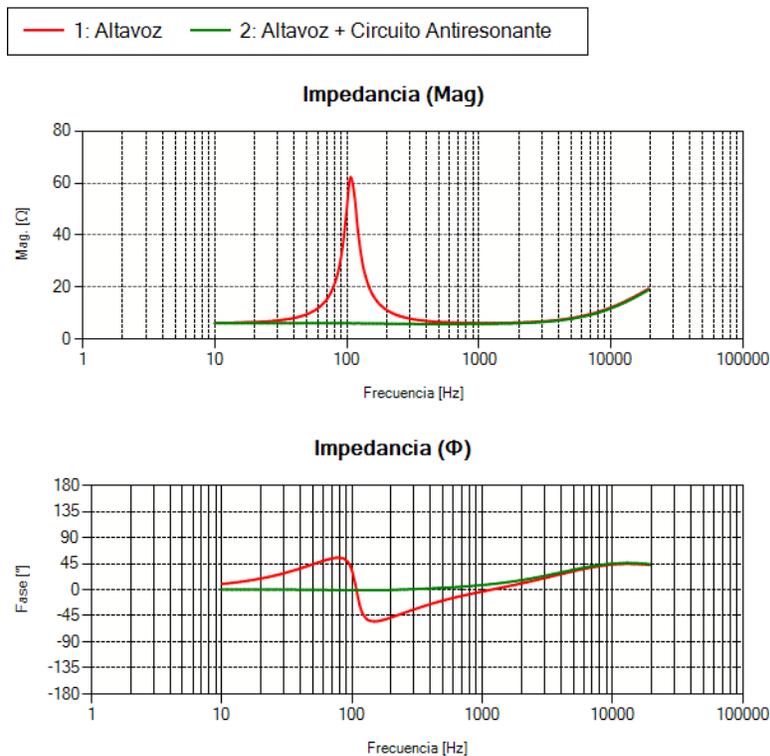


Figura 4.23: Gráfica de impedancia del altavoz con circuito anti resonante.

Los resultados de agregar estos dos circuitos se observan en la Figura 4.24, en donde la impedancia de este sistema tiende a ser constante y resistivo puro.

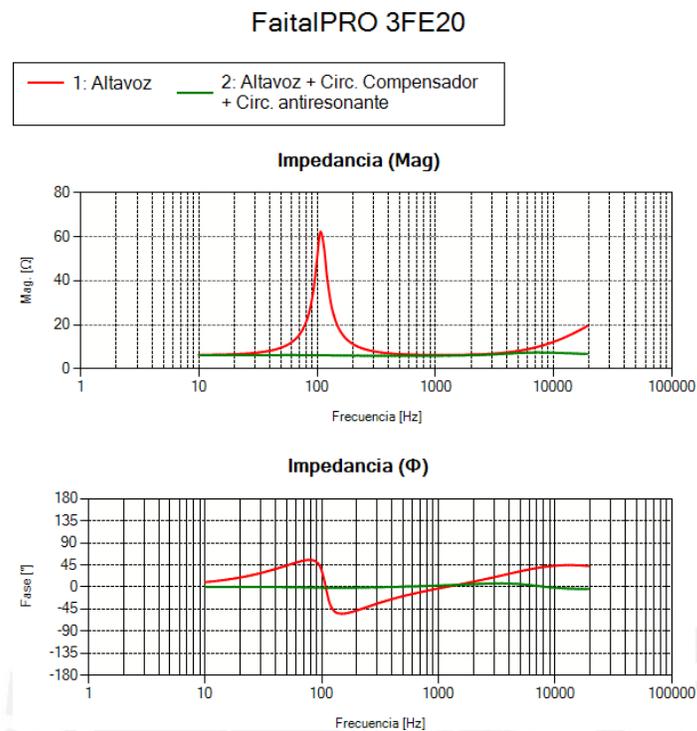


Figura 4.24: Gráfica de impedancia del altavoz con circuito anti resonante y compensador de efecto inductivo.

### 3.7.3 Función de transferencia del filtro.

Para este caso se utilizó un filtro pasabajos de primer orden con topología Butterworth y frecuencia de corte igual a 1000 Hz. En la Figura 4.25 se muestra la ventana del software con los valores obtenidos.

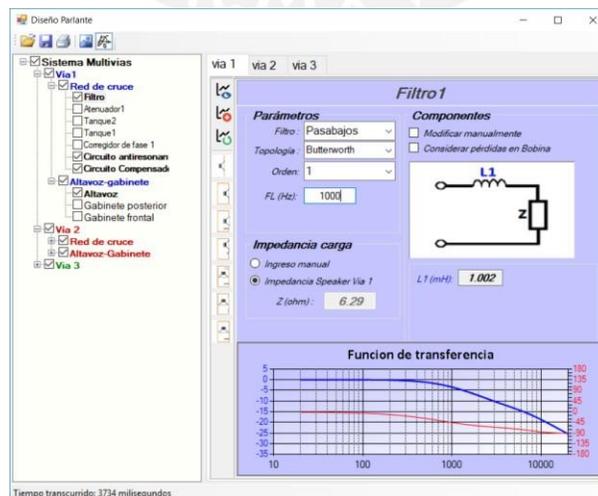


Figura 4.25: Captura de pantalla de software con los resultados del Filtro

En la Figura 4.26 se observan la función de transferencia del filtro implementado, en donde se aprecia cómo se vería afectada, si se incluyen los circuitos correctores de impedancia calculados.

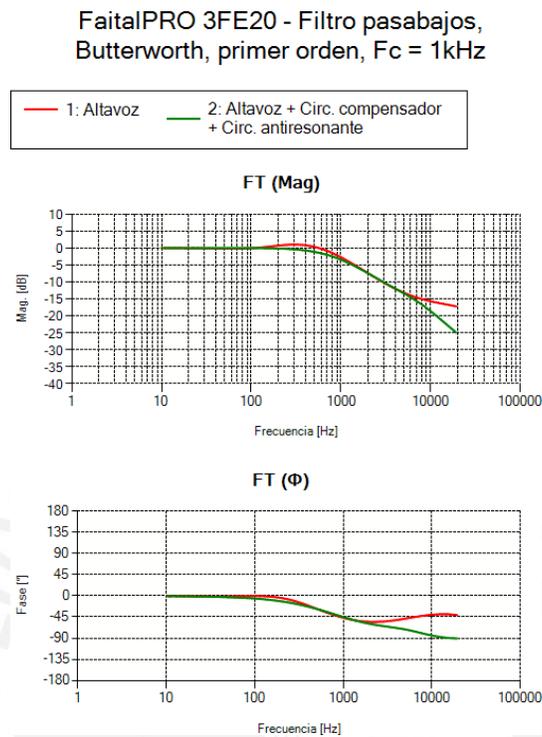


Figura 4.26: Función de transferencia de filtro pasabajos para distintos tipos de carga

También podemos apreciar, en la Figura 4 27, la variación del nivel de presión sonora ante la activación de los circuitos de la red de cruce evaluados.

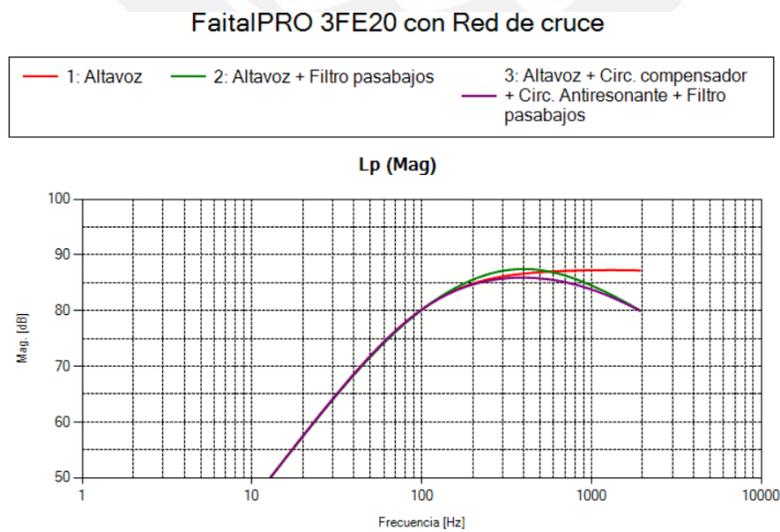


Figura 4 27: Nivel de presión sonora del altavoz con filtro y circuitos correctores de impedancia.

### 3.7.4 Pérdidas por inserción en bobina.

El software permite agregar una resistencia en serie a las bobinas para simular las pérdidas por inserción. En la Figura 4.28 se observa que para este caso se está considerando una resistencia de 0.8 ohmios.

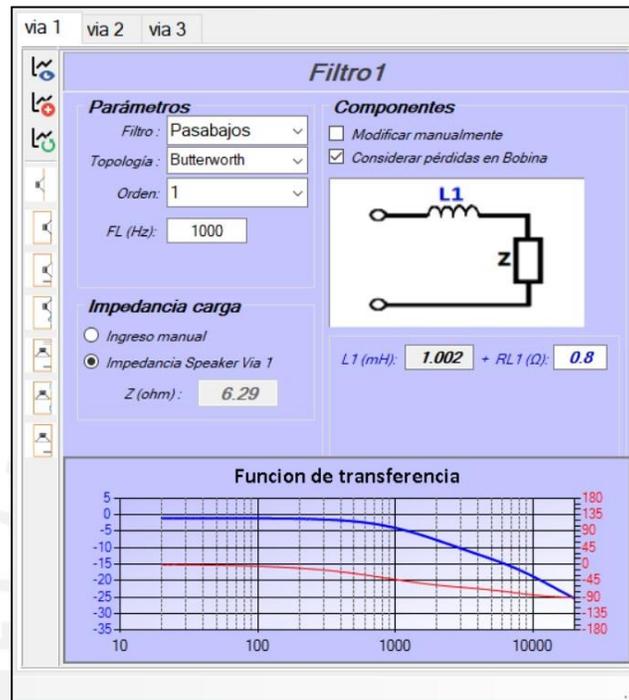


Figura 4.28: Captura de pantalla de ingreso de parámetros de filtro considerando pérdidas en bobina.

También podemos apreciar, en la Figura 4.29, cómo se ve atenuada la función de transferencia del filtro.

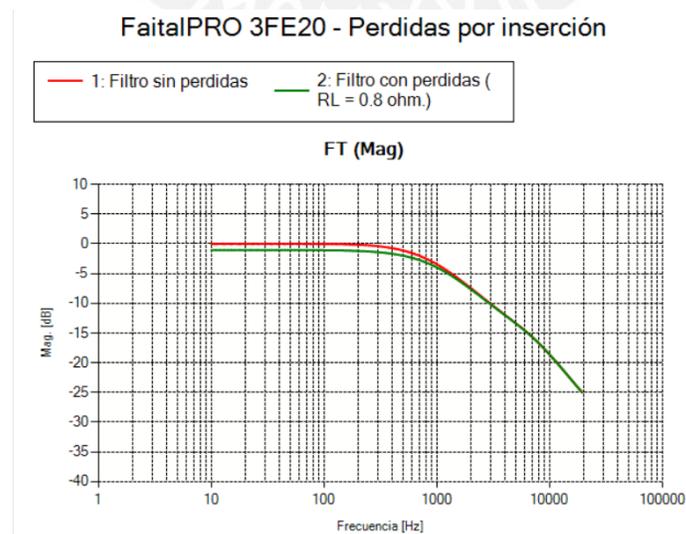


Figura 4.29: Funcion de transferencia del filtro con y sin pérdidas

En la Figura 4.30 se muestra el diagrama esquemático de la red de cruce pasiva a construir según los resultados producidos por el software de simulación. Se puede considerar que existe resistencia en serie a la bobina ideal del filtro pasabajos (ubicada entre los puntos A y B de la Figura 4.30) debido a las pérdidas por inserción.

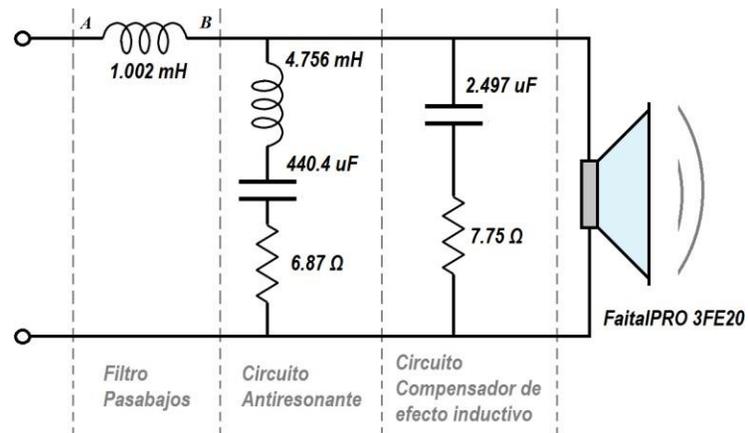


Figura 4.30: Diagrama de circuito esquemático

### **3.8 PLAN DE NEGOCIO**

Dadas sus prestaciones, el software de simulación de altavoces podría ser comercializado como una herramienta que ayude a las compañías del rubro a optimizar sus procesos de producción y con ello incrementar su margen de ganancia; también se podría presentar ante universidades o institutos como un software de apoyo en la enseñanza de asignaturas como electroacústica, diseño de altavoces u otros cursos afines.

Dado que el software no requiere de un programa adicional para su funcionamiento, esto abarata los costos de producción, haciendo viable su comercialización en el mercado local e internacional y la plataforma de venta principal para el mercado internacional sería internet.

Una de las dificultades que se podrían presentar al intentar comercializarlo localmente, es que el mercado peruano no cuenta con una gran industria dedicada a la construcción de altavoces, sin embargo, también podría verse como una oportunidad para que pequeños empresarios o diseñadores de altavoces puedan hacer crecer la oferta y con ello, la demanda de sistemas de altavoces según el requerimiento del cliente.

Actualmente en el mercado local se construyen, sistemas de altavoces montados en gabinetes de dimensiones únicas que no son optimizados según el tipo de altavoz; para ellos el software sería de gran ayuda, ya que podrían diseñarse gabinetes óptimos que tomen en cuenta los parámetros propios del altavoz a utilizar.

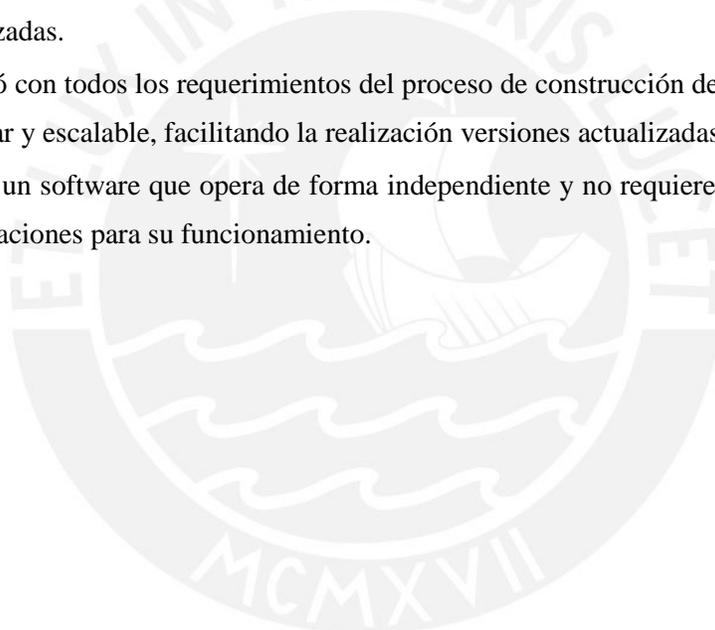
Debido al método utilizado en su proceso constructivo, es posible incluir módulos que mejoren las simulaciones obtenidas o realizar versiones que recojan los nuevos requerimientos de los usuarios; con ello podemos implementar nuevas actualizaciones según la demanda del mercado.

Para lograr su aceptación, se recomienda mejorar la interfaz de grafica con diseños que puedan hacer al software más atractivo para el profesional de la industria local e internacional.

## CONCLUSIONES

Después de desarrollar la tesis se concluye que:

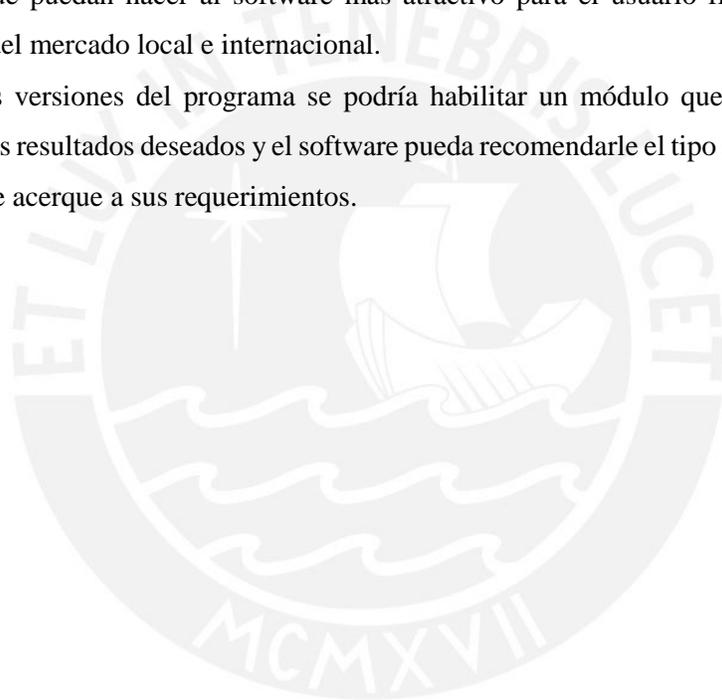
- Se diseñó e implementó un software para profesionales del diseño de altavoces.
- Se analizaron los requerimientos para un correcto diseño de sistemas de altavoces y con ello se presentó una propuesta de solución para el desarrollo del software de simulación; creando una herramienta útil para el profesional en el diseño de altavoces.
- Se Implementó una herramienta de apoyo a los docentes en la enseñanza de temas relacionados a la electroacústica.
- Se realizó un proceso de construcción de software iterativo y modular que le permite ser flexible para nuevas actualizaciones e incluso agregar nuevos módulos o etapas en la red de cruce utilizadas.
- Se cumplió con todos los requerimientos del proceso de construcción del software, logrando ser modular y escalable, facilitando la realización versiones actualizadas del mismo.
- Se obtuvo un software que opera de forma independiente y no requiere de la instalación de otras aplicaciones para su funcionamiento.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda lo siguiente:

- Por practicidad en el modelo, algunos valores son considerados constantes, pero en realidad no lo son (como es el caso de la resistencia acústica del material absorbente en el gabinete acústico cerrado), por lo que es recomendable se incluya en nuevas actualizaciones un módulo en donde se puedan cargar las mediciones de algunos parámetros del altavoz o en su defecto elegir asignarles como valor una función que depende de la frecuencia.
- Para lograr su aceptación en el mercado, se recomienda mejorar la interfaz de grafica con diseños que puedan hacer al software más atractivo para el usuario final y con ello a la industria del mercado local e internacional.
- En futuras versiones del programa se podría habilitar un módulo que permita al usuario ingresar los resultados deseados y el software pueda recomendarle el tipo de gabinete acústico que más se acerque a sus requerimientos.



## BIBLIOGRAFÍA

- Ahonen, J. (2007). *Electroacoustic modelling of the subwoofer enclosures*. Linearteam.
- Avellaneda, G., Guerrero, A., Rodriguez, C., & Maldonado, F. (2015). Medición de los Parámetros Thiele-Small del Altavoz YUM – YD 158.
- Beranek, L. L. (1961). *Acústica*. Buenos aires, Argentina: Editorial Hispano Americana S. A.
- Beranek, L., & Mellow, T. (2012). *Acoustics: Sound Fields and transducer*. Waltham, EE. UU.: Elsevier Inc.
- Beyma. (2018, 11 29). *Apuntes del altavoz electrodinámico*. Retrieved from Beyma profesional loudspeaker: <https://www.beyma.com/>
- Dickanson, V. (2006). *Loudspeaker design cookbook 7th edition*. Peterborough: Old Colony Sound Lab.
- Dovale, M. I. (2019, Mayo 3). *SlideShare*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/mdovale/filtros>
- FaitalPRO. (2019, 08 02). *FaitalPRO 3FE20*. Retrieved from [https://fitalpro.com/es/products/archived\\_products/product\\_details/LF/datasheet.php?id=401000090](https://fitalpro.com/es/products/archived_products/product_details/LF/datasheet.php?id=401000090)
- Merhaut, J. (2008). *Theory of electroacoustics*. California: McGraw-Hill International Book Company .
- Microsoft. (2019, 11 13). <https://docs.microsoft.com/>. Retrieved from <https://docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2019>
- Miyara, F. (n.d.). *Introducción a la electroacústica*. Rosario, Argentina.
- Pueo Ortega, B., & Romá Romero, M. (2003). *Electroacústica: Altavoces y Micrófonos*. Madrid: Pearson educación SA.
- Ramón, F. (2016, 05 06). *Equaphone university*. Retrieved from <http://www.equaphon-university.net/impedancia-del-altoparlante/>
- Sacerdoti, E. (2017, Noviembre 16). *Equaphon University*. Retrieved marzo 8, 2019, from <http://www.equaphon-university.net/parametros-thiele-small/>

- Saldías, R., Matamala, S., & Concha, J. (2000). Análisis de Sistemas de Altavoces para Sub-Bajos Pasa Banda. *XXXI Congreso Nacional de Acústica - TECNIACÚSTICA*. Madrid.
- Small, R. (1971). Direct Radiator Loudspeaker System Analysis. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics– Vol AU-19* , 269-281.
- SMALL, R. (2006). Vented-Box Loudspeaker Systems Part 1: Small-Signal Analysis. *Journal of the audio engineering society*, 316-325.
- SMALL, R. H. (2006). Vented-Box Loudspeaker Systems Part 2: Large-Signal Analysis. *Journal of the audio engineering society*, 326-332.
- SMALL, R. H. (2006). Vented-Box Loudspeaker Systems Part 3: Synthesis. *Journal of the audio engineering society*, 333-338.
- THIELE, A. (2001). Loudspeakers in Vented Boxes: Part I. *Journal of the audio engineering society*, 181-191.
- THIELE, A. N. (2001). Loudspeakers in Vented Boxes: Part II. *Journal of the audio engineering society*, 192-204.
- Valkenburg, M. E. (1982). *Analog Filter Design*. New York: Holt-Saunders International Editions.