

## TRABAJO PRÁCTICO 2: MEDICIÓN DE GABINETES SINTONIZADOS

JONATHAN D. FREIDKES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Tres de Febrero, Electroacústica II, Buenos Aires, Argentina.  
jonifreidkes@gmail.com

**Resumen** – Se realiza el presente trabajo con el fin de visualizar y verificar empíricamente las diferencias entre el comportamiento de un parlante al aire libre y montado en un gabinete sintonizado. También se busca modificar condiciones del gabinete con el fin de ver la influencia de material absorbente y el largo del tubo de sintonía. Se miden inicialmente los parámetros de Thiele-Small con el parlante libre y se obtiene la curva de impedancia correspondiente para luego comparar con las medidas en las diferentes condiciones de caja acústica experimentado. Asimismo, se obtiene la respuesta en frecuencia de todos los sistemas analizados y finalmente se simula el gabinete con software especializado para comparar todos los casos.

### 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Como fue demostrado en trabajos anteriores, los parámetros de Thiele-Small son de utilidad a la hora de comparar distintos transductores y realizar un diseño de gabinete acústico. También se ha expuesto respecto de los beneficios de aplicar métodos de medición computarizados, a través del software LIMP y el simple circuito asociado, que calcula y mide valores confiables y precisos de manera sencilla y rápida.

Otra finalidad del trabajo es analizar el comportamiento del altoparlante en interacción con el gabinete acústico sintonizado. Se conoce por la teoría y análisis la influencia de las distintas cajas acústicas al parlante en su impedancia y respuesta en frecuencia, con lo cual se busca experimentar para comprobar la magnitud de dichos fenómenos. También se busca comparar entre distintas modificaciones de un diseño de gabinete para el mismo transductor y sus respuestas en frecuencia correspondientes. La intención de esta etapa es ver las variaciones en la sintonización del gabinete cambiando condiciones del port de sintonía, el tubo correspondiente y la absorción interna.

Asimismo, en la última etapa del trabajo se comparan los resultados obtenidos con una simulación realizada para los parámetros obtenidos del parlante medido. En este caso se analiza la exactitud de cálculo del software en comparación a las mediciones empleadas y posibles errores en ambos procedimientos.

### 2. MARCO TEÓRICO

La implementación de un gabinete para el montaje de un parlante trae varios beneficios que solucionan problemas propios del transductor al aire libre. Principalmente separa ambas caras del altavoz,

mejorando la cancelación que se da por diferencias de polaridad para ciertas frecuencias, sobre todo bajas. La implementación de gabinetes sintonizados, también llamados ventilados, trae otros beneficios, sobre todo en la extensión del rango de respuesta en frecuencia hacia la zona más baja. Al combinar el parlante con un gabinete, tubo de sintonía y port, la respuesta en frecuencia llega a zonas donde el parlante solo no es útil. Esto se logra con la combinación de la respuesta del parlante, de respuesta similar a un filtro de segundo orden (pendiente de 12 dB por octava) con el accionar del gabinete sintonizado, otro filtro de segundo orden, generando así un filtro total de cuarto orden (24 dB por octava). Una primera consecuencia que se da por ello es una pendiente de crecimiento pronunciada en baja frecuencia, con lo cual la respuesta caerá abruptamente en frecuencias menores a la sintonización del port. Se utiliza el gabinete y la abertura a modo de resonador de Helmholtz excitado por el movimiento del parlante, por lo cual cerca de la frecuencia de sintonización de ese tubo, se espera que funcione casi exclusivamente el resonador y la respuesta del parlante sea muy baja. Dependiendo del punto de sintonía y de la  $f_s$  del parlante utilizado, será la transición en la respuesta en frecuencia, entre la respuesta del resonador y la del parlante en el gabinete. Este fenómeno tiene su repercusión en la curva de impedancia, donde ahora no se observa un único pico, sino dos cuya magnitud dependerá de la cercanía entre  $f_s$  y  $f_p$  (sintonía del port), el material absorbente utilizado y largo del tubo, entre otras cosas.

Es posible hallar la sintonía de un gabinete desconocido a través de dos métodos sencillos:

- Medir respuesta en frecuencia cerca del port y cerca del parlante. Se nota la sintonización donde el parlante tiene

mínima respuesta y en simultáneo, el port tiene máxima.

- Medir respuesta de impedancia y su fase correspondiente. El punto mínimo en magnitud entre los dos picos principales, que se corresponde con el 0 grados en fase marca donde se encuentra la sintonización del gabinete.

## 2.1. Parámetros Thiele – Small

Definiciones extraídas del apunte dado por la cátedra [1] y del paper de Small [2].  
 $f_s$ : Frecuencia de resonancia.  
 $R_{es}$ : Dual eléctrico de la resistencia de suspensión por pérdidas.  
 $R_e$ : Resistencia de la bobina a corriente continua.

$S_d$ : Área efectiva proyectada del diafragma.  
 $Q_{es}$ : Medida del control que efectúa la suspensión mecánica sobre el cono.  
 $Q_{ms}$ : Medida del control que efectúa la suspensión eléctrica del sistema.  
 $Q_{ts}$ : Q total considerando mecánico y eléctrico.  
 $V_{as}$ : Volumen de aire con igual compliancia acústica que la suspensión.  
 $\eta_0$ : Eficiencia o rendimiento. Porción de la potencia entregada que es efectivamente transformada en presión sonora.  
 $X_{MAX}$ : Desplazamiento límite del diafragma.  
 $L_e$ : Inductancia de la bobina.  
 $Bl$ : Producto del flujo magnético en el entrehierro con el largo del bobinado.

## 3. EQUIPAMIENTO UTILIZADO

Para la realización de todas las experiencias se requirió el siguiente equipamiento:

- Computadora de escritorio con software Smaart y LIMP.
- Interfaz de audio Digidesign Digi 003.
- Altoparlante B&C 12PLB76 8 ohm.
- Multímetro UNIT UT-61D
- Gabinete sintonizado realizado en UNTreF.
- Amplificador de potencia Peavey.
- Resistencia  $R_{lim}$  comercial 220  $\Omega$ .
- Micrófono de medición Earthworks con soportes.
- Cableado de señal balanceada y desbalanceada.
- Macbook pro early 2010 con software de simulación de gabinetes.

## 4. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

### 4.1. Método con software LIMP

La Figura 1 muestra el conexionado utilizado para la medición con LIMP.

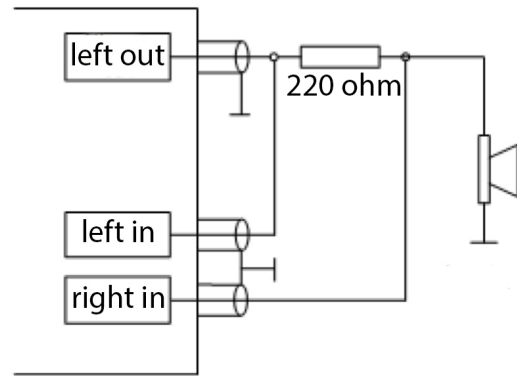


Figura 1: Esquema de conexionado para medición con software LIMP.

El software genera la señal que se rutea de la salida de línea L de la interfaz de audio hacia el altoparlante en prueba a través del paso por  $R_{lim}$ . En simultáneo, las entradas de línea de la interfaz funcionan en modo similar a las puntas de un osciloscopio, por lo que también se comparte la masa internamente con la salida que esta conectada al altoparlante. Se eligió ese valor de resistencia con el fin de optimizar la circulación de corriente por los componentes y las impedancias de salida de la interfaz, ya que es importante considerar que el instrumental no es dedicado para este tipo de mediciones. Sin embargo, con un valor como el elegido, los resultados son exactos y no se sobre-exige al instrumental involucrado, ya que se involucra baja magnitud de corriente a través de la interfaz.

Inicialmente se realiza la calibración del sistema para que ambos canales trabajen con la misma ganancia durante la medición, como se muestra en la Figura 2.

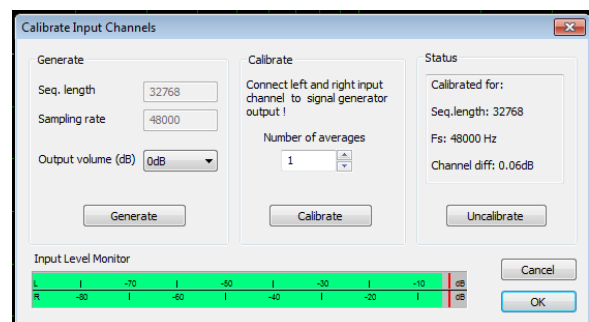


Figura 2: Calibración de software LIMP.

Como fue demostrado en el trabajo práctico que antecede al presente, la utilización de la señal *step sine sweep* puede ser beneficioso en términos de relación señal a ruido durante la medición, especialmente en recintos que

distan de condiciones ideales. De todos modos para optimizar el tiempo disponible para la realización de las experiencias, la señal elegida para la excitación fue el ruido rosa. Los resultados obtenidos no son tan lejanos a los que se podrían obtener con el sweep, pero en cuanto a tiempos de medición y procesamiento, es mucho más veloz.

Es conocida la necesidad de implementar el método de masa agregada para el cálculo completo de los parámetros Thiele-Small, por lo que se eligió un valor de 27.8 gramos para que se correspondiera con el tamaño del altavoz analizado y tuviera notable influencia sobre la curva de impedancia para considerar efectiva esta medición.

#### 4.2. Método con Smaart

Para la medición acústica de respuesta en frecuencia se realiza la conexión como se muestra en la Figura 3.

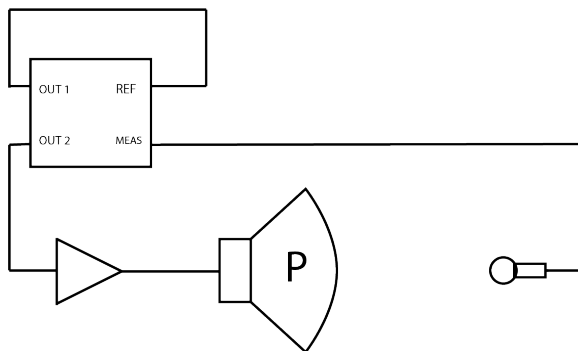


Figura 3: Conexión con software Smaart.

Se realiza en el software la función de transferencia entre las señales *REF* y *MEAS* que representan la referencia y la medición respectivamente. Con la emisión de ruido rosa en ambas salidas se compara la señal sin procesamiento con la que pasa por amplificador, crossover, parlante, gabinete, recinto de medición, micrófono de medición, cableado e interfaz de audio.

Para todas las condiciones se evalúa una posición muy cercana al parlante (1 o 2 cm aproximadamente), una a la misma distancia del port, y una alejada del sistema, a unos 65 cm para poder visualizar la influencia tanto del accionar del transductor, como del resonador formado por el gabinete sintonizado.

#### 4.3. Simulación de gabinete con software

A través del software *Basta!* desarrollado por Tolvan Data, se realiza la simulación del gabinete de acuerdo al

cálculo del programa. Se ingresan datos del parlante analizado, específicamente  $f_s$ ,  $R_e$ ,  $Q_{es}$ ,  $Q_{ts}$ ,  $V_{as}$ ,  $S_d$  y  $L_e$ , valores obtenidos a través de la medición con LIMP. También se utilizan medidas físicas del gabinete: dimensiones, volumen, diámetro del port, su largo y área. De acuerdo al tipo de caja pedida por el usuario, el programa calcula basado en los parámetros ingresados y también sugiere tipo de caja que se debería diseñar y su volumen. Por otra parte tiene un sistema de detección de anomalías, con lo que alerta al usuario por valores que no son convenientes para cada diseño. En contracara de su sencillo uso, brinda información muy completa respecto del comportamiento del gabinete en cuestión: curva de respuesta de impedancia, funcionamiento completo del sistema, respuesta en frecuencia del transductor y muchas otras curvas de respuesta, en la magnitud que se quiera observar: acústica, eléctrica, mecánica o combinaciones. Aprovechando la facilidad de cálculo y diseño brindada, se genera otra simulación más allá de lo solicitado para este trabajo, con el fin de observar el comportamiento si se siguiera la recomendación dada por el software para el transductor analizado.

### 5. RESULTADOS

El cálculo del software LIMP permite obtener los parámetros Thiele-Small del parlante analizado, que se muestran en la Tabla 1 en comparación con los valores proporcionados por el fabricante.

Parámetro	Valor medido	Fabricante
$f_s$	59.07 Hz	50 Hz
$R_e$	5.2 ohm	5 ohm
$L_e$	446.12 uH	1.2 mH
$Q_{ts}$	0.33	0.23
$Q_{es}$	0.34	0.24
$Q_{ms}$	6.62	5.3
$M_{ms}$	45.41 g	51 g
$R_{ms}$	2.6167 kg/s	-
$C_{ms}$	0.00016 m/N	-
$V_{as}$	58.75 l	75 l
$S_d$	510.71 cm <sup>2</sup>	522 cm <sup>2</sup>
$Bl$	16.2408 Tm	18.6 Tm
$L_p$	99.41 dB (2.83V/1m)	-

Tabla 1: Parámetros Thiele-Small para B&C 12PLB76 con software LIMP y datos por el fabricante.

Se muestra en la Figura 4 la comparación de curvas de impedancia obtenidas para el parlante en estado de aire libre y en el gabinete sintonizado sin ninguna modificación respecto del diseño original.

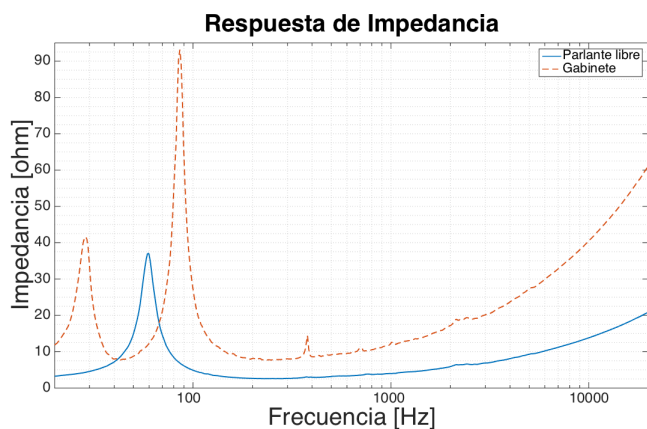


Figura 4: Curvas de impedancia para parlante al aire libre y en gabinete sintonizado. Trazo continuo azul para el parlante libre y trazo naranja discontinuo para gabinete sintonizado.

En la Figura 5 se muestra la respuesta en fase correspondiente a las mismas mediciones de impedancia del parlante al aire libre y en gabinete sintonizado.

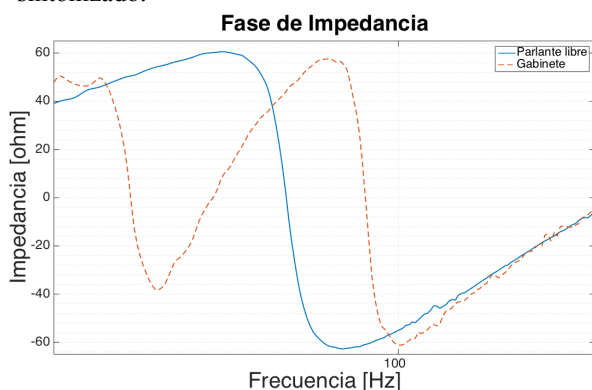


Figura 5: Curvas de fase de impedancia para parlante al aire libre y en gabinete sintonizado. Trazo continuo azul para el parlante libre y trazo naranja discontinuo para gabinete sintonizado.

La Figura 6 muestra un esquema del gabinete utilizado y sus medidas. Se observa el port de sintonización junto con el tubo correspondiente en la cara superior del gabinete, con el parlante montado en el frente. En el interior del gabinete se encuentran dos placas cuadradas de material fonoabsorbente de aproximadamente 70 cm de lado de densidad media. Se calcula un volumen de 63.17 litros para el gabinete. El tubo de sintonización tiene 11.5 cm de largo, con un diámetro de 10.5 cm, dando un área de aproximadamente 86.59 cm<sup>2</sup>.

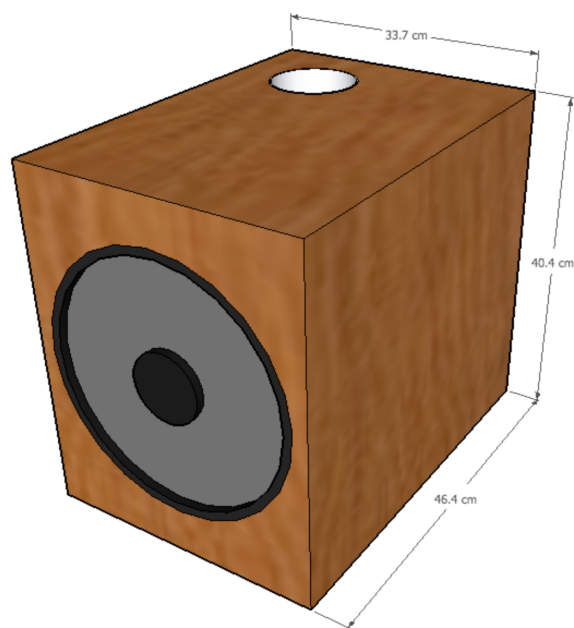


Figura 6: Esquema del gabinete medido.

A través de la medición con el software Smaart se obtiene la respuesta en frecuencia del gabinete analizado. Como fue mencionado en el apartado 2, se mide una respuesta muy cercana al parlante y una del port a la misma distancia. Se asume que la respuesta final debiera acercarse a la suma energética entre ambas y obtener una respuesta de rango extendido por la suma del aporte del resonador de Helmholtz (port) y el funcionamiento del transductor. La Figura 7 muestra la comparación de las tres mediciones efectuadas.

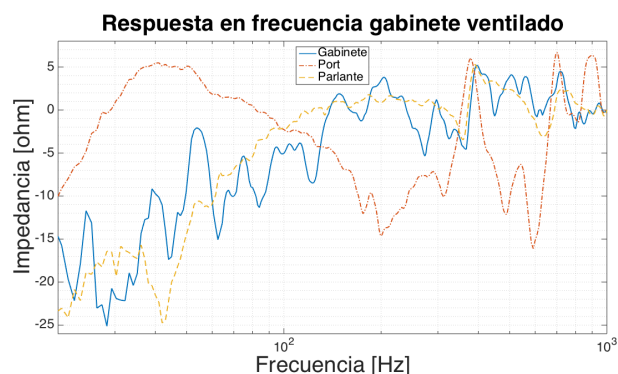


Figura 7: Respuesta en frecuencia. Trazo continuo azul para el gabinete a 65 cm, trazo naranja discontinuo con punto para port y trazo amarillo discontinuo para parlante.

A continuación se experimenta con el largo del tubo de sintonía, primero agregando otra sección que lo alarga y luego quitando el tubo original y dejando

solamente el agujero del port. Las Figuras 8 y 9 muestran la respuesta de impedancia y fase respectivamente del primer caso, el tubo alargado a un valor total de 25 cm.

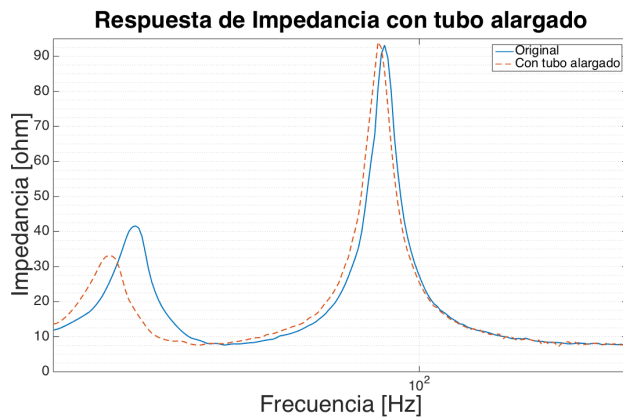


Figura 8: Curvas de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con tubo más largo. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para tubo largo.

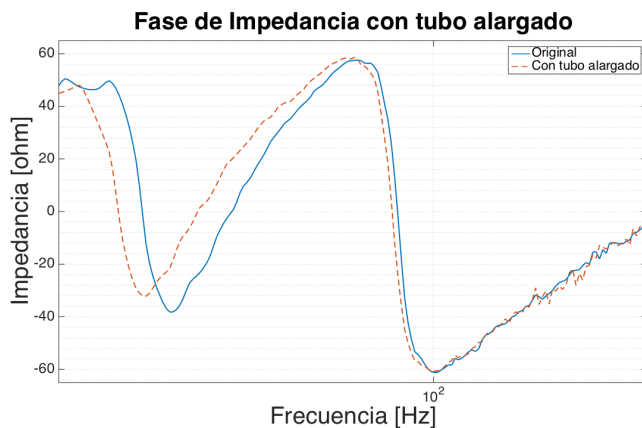


Figura 9: Fase de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con tubo más largo. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para tubo largo.

La Figura 10 muestra el análisis de transferencia bajo las mismas condiciones de tubo más largo que en el diseño original.

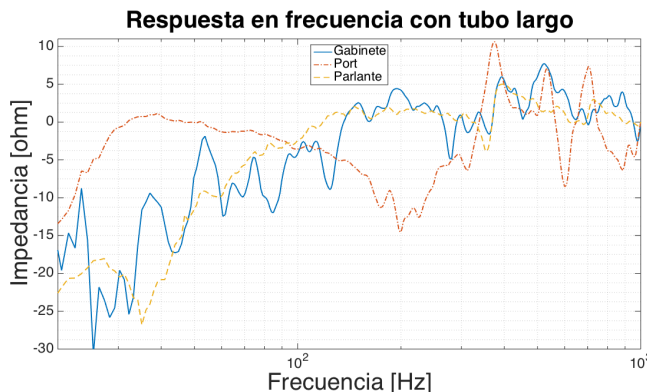


Figura 10: Respuesta en frecuencia para tubo alargado. Trazo continuo azul para el gabinete a 65 cm, trazo naranja discontinuo con punto para port y trazo amarillo discontinuo para parlante.

Se analiza luego el caso de sacar el tubo para obtener el mínimo largo de tubo posible, que corresponde solo al espesor de la madera de construcción del gabinete, de 1.8 cm aproximadamente. En las Figuras 11 y 12 se muestra el resultado de la medición de impedancia y su fase en esta condición.

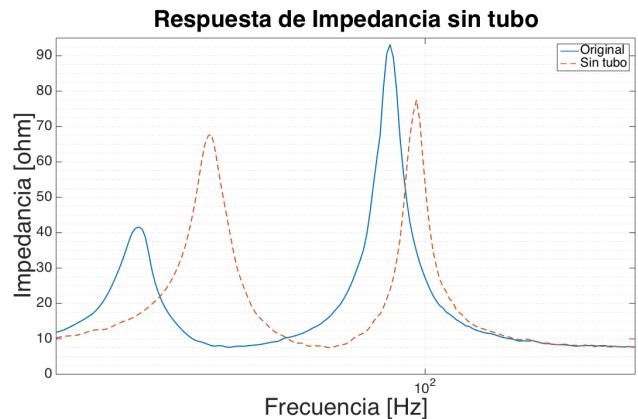


Figura 11: Curvas de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y sin tubo. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para condición sin tubo.

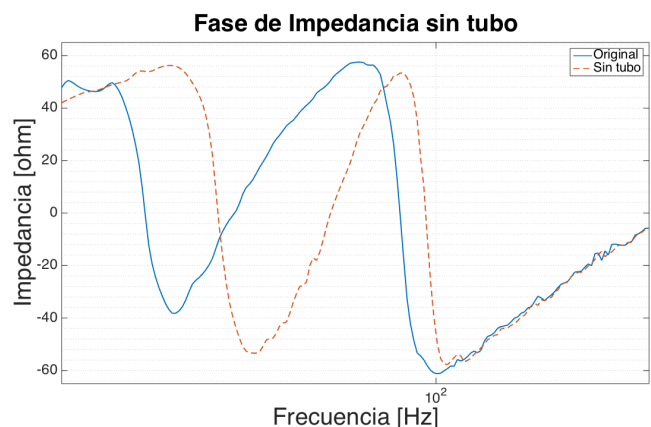


Figura 12: Fase de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y sin tubo. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para condición sin tubo.

Consistentemente con el análisis realizado, se muestra en la Figura 13 la respuesta en frecuencia obtenida para el sistema en esta condición.

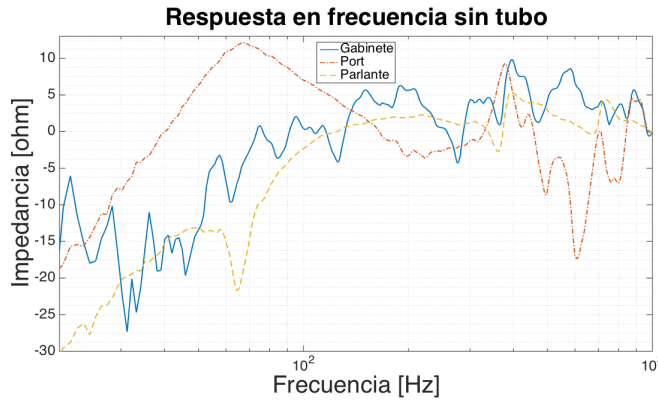


Figura 13: Respuesta en frecuencia para gabinete sin tubo. Trazo continuo azul para el gabinete a 65 cm, trazo naranja discontinuo con punto para port y trazo amarillo discontinuo para parlante.

A continuación se decide agregar material absorbente al gabinete para observar el efecto en la respuesta del sistema. Se agrega toda la cantidad posible de lana de vidrio para que sea notorio el cambio. Se observan los cambios en magnitud y fase de impedancia en las Figuras 14 y 15.

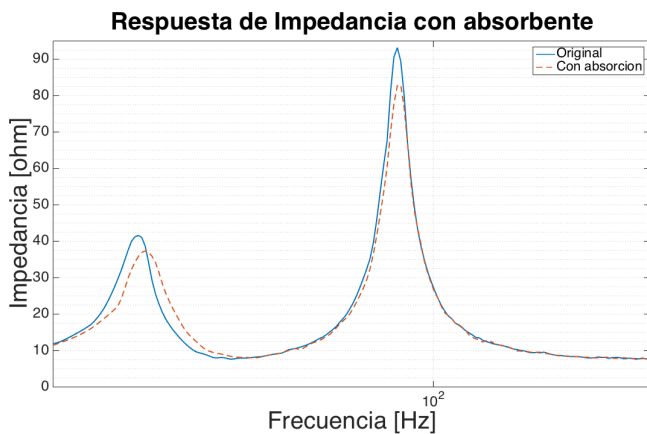


Figura 14: Curvas de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con absorción agregada. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para condición con más absorción.

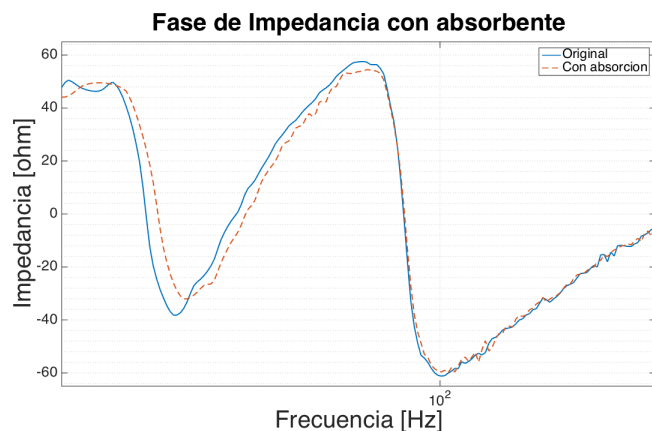


Figura 15: Fase de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con absorción agregada. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para condición con más absorción.

Se muestra luego en la Figura 16 la respuesta en frecuencia en la condición de absorbente adicional.

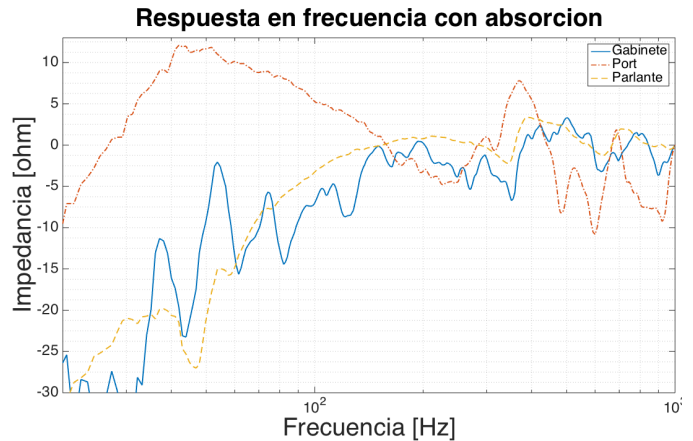


Figura 16: Respuesta en frecuencia para gabinete con absorción adicional. Trazo continuo azul para el gabinete a 65 cm, trazo naranja discontinuo con punto para port y trazo amarillo discontinuo para parlante.

Es conocido que los gabinetes cerrados, sin port de sintonización, tienen distinta respuesta en frecuencia y en impedancia que las cajas ventiladas, por lo que se procede a tapar el port con una madera apoyada encima y a realizar las mediciones para comparar. La Figura 17 muestra la magnitud de la impedancia para esta situación y la Figura 18 la fase respectiva.

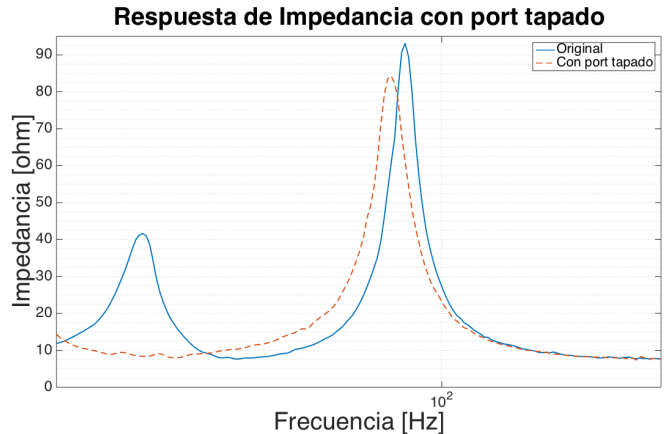


Figura 17: Curvas de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con port tapado. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para port tapado.



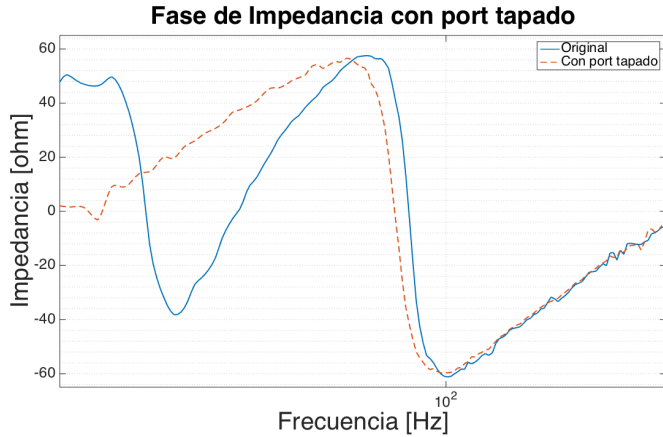


Figura 18: Fase de impedancia para gabinete sintonizado en diseño original y con port tapado. Trazo continuo azul para el diseño original y trazo naranja discontinuo para port tapado.

En la Figura 19 se ve la respuesta en frecuencia correspondiente obtenida para este caso.

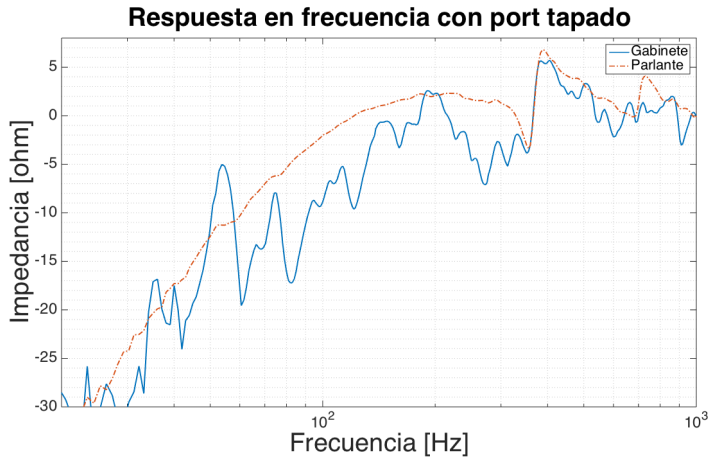


Figura 19: Respuesta en frecuencia para gabinete con port tapado. Trazo continuo azul para el gabinete a 65 cm y trazo naranja discontinuo con punto para parlante.

Como se observa que las mediciones de transferencia están muy influenciadas por la respuesta recinto, se decide simular una respuesta esperada para el gabinete completo. Para esto, se normaliza la respuesta del port respecto de la del parlante a través de la ecuación:

$$RF_{port\ norm} = RF_{port\ med} + 10 \log\left(\frac{S_{port}}{S_D}\right) \quad (1)$$

Donde  $RF_{port\ norm}$  es la respuesta en frecuencia del port normalizado,  $RF_{port\ med}$  es la respuesta en frecuencia del port medida y  $S_{port}$  es la superficie del port.

Al obtener esta respuesta normalizada, se procede a realizar la suma energética de la respuesta del parlante y del port, para simular el sistema completo. Se muestran los resultados en la Figura 20.

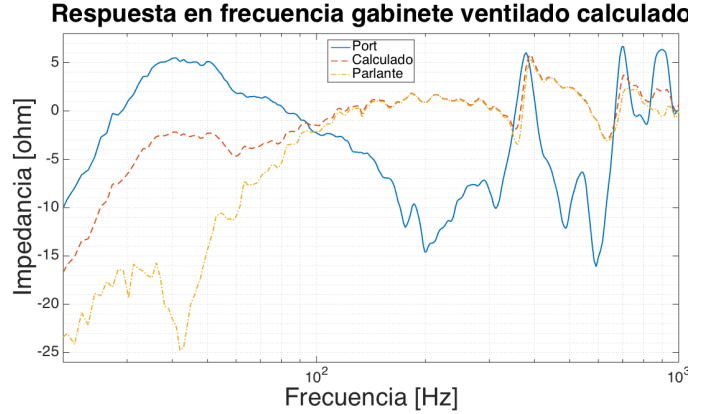


Figura 20: Respuesta en frecuencia simulada. Trazo continuo azul para el port, trazo naranja discontinuo para el cálculo y trazo amarillo discontinuo con punto para parlante.

Las Figuras 21 y 22 muestran varias curvas correspondientes a la simulación de gabinete. Con los valores medidos del parlante y del gabinete analizado, se logra simular la respuesta a través del software.

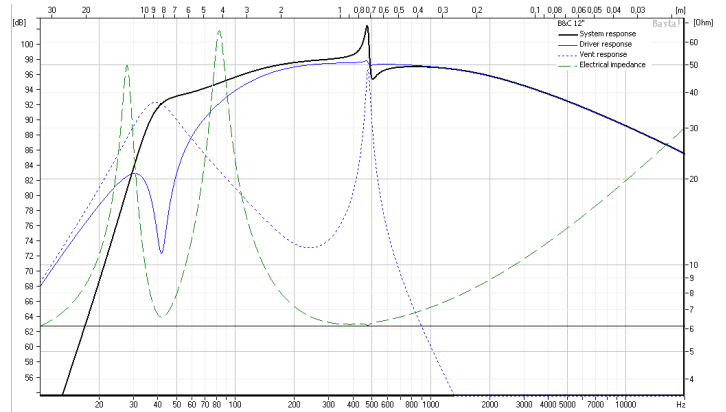


Figura 21: Respuesta simulada por Basta!. Trazo continuo negro para la respuesta en frecuencia del sistema, trazo continuo azul para la respuesta del parlante, trazo azul discontinuo para la respuesta en frecuencia del port y trazo discontinuo verde para la respuesta de impedancia del sistema completo.

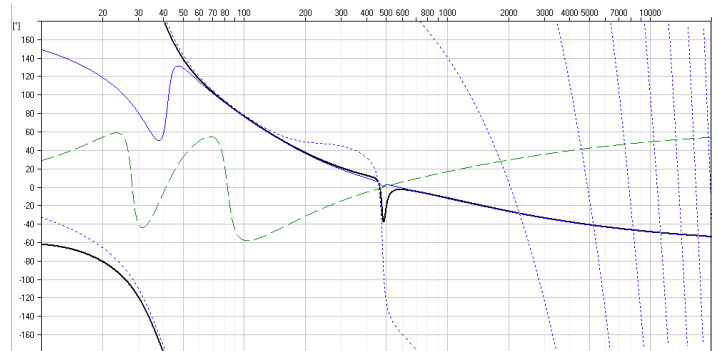


Figura 22: Respuesta de fase simulada por Basta!. Trazo continuo negro para el sistema completo, trazo continuo azul para la respuesta del parlante, trazo azul discontinuo para la respuesta del port y trazo discontinuo verde para la respuesta de impedancia del sistema completo.

Siguiendo las recomendaciones dadas por el software utilizado, se diseña un gabinete de 30 litros, con port sintonizado en 75 Hz utilizando el altoparlante especificado. Los resultados se observan en las Figuras 23 y 24.

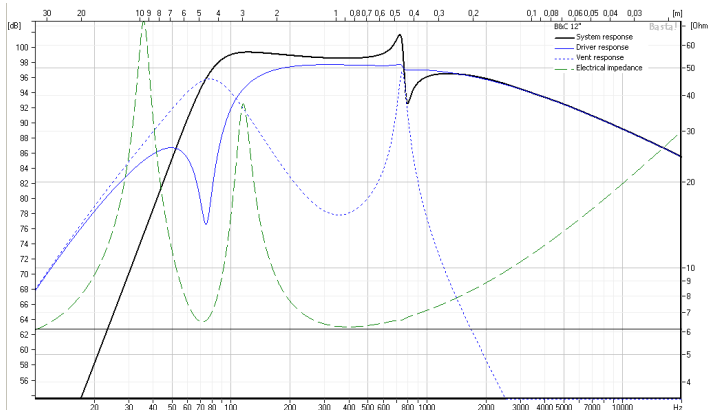


Figura 23: Respuesta simulada por *Basta!* siguiendo las sugerencias. Trazo continuo negro para la respuesta en frecuencia del sistema, trazo continuo azul para la respuesta del parlante, trazo azul discontinuo para la respuesta en frecuencia del port y trazo discontinuo verde para la respuesta de impedancia del sistema completo.

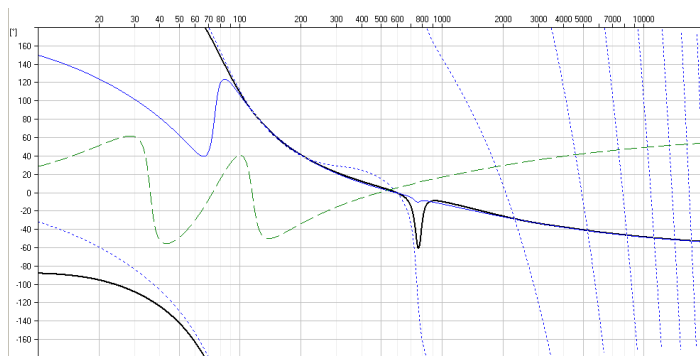


Figura 24: Respuesta de fase simulada por *Basta!* siguiendo las sugerencias. Trazo continuo negro para el sistema completo, trazo continuo azul para la respuesta del parlante, trazo azul discontinuo para la respuesta del port y trazo discontinuo verde para la respuesta de impedancia del sistema completo.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de los datos obtenido, es importante considerar que las mediciones fueron llevadas a cabo en condiciones que no responden a las necesarias en un laboratorio de ensayos acústicos. Principalmente, el recinto de medición dista de un lugar ideal para mediciones acústicas: pobre aislación, tratamiento acústico interno nulo, tiempo de reverberación no controlado y falta de criterio modal en el diseño. Como el altoparlante es un sistema electro-mecano-acústico, las mediciones pueden ser influenciadas por ruido incidente sobre el parlante, movimiento mecánico indeseado sobre la superficie de apoyo o interferencias eléctricas en el sistema de medición. De todos modos, con esta consideración, la metodología implementada apunta a técnicas de maximización de la relación señal-ruido,

por lo que los resultados obtenidos son confiables. Asimismo, como en toda medición científica, existe un grado de incertidumbre dado por el instrumental, el ambiente de medición, los métodos aplicados y muchos otros factores. Por lo tanto, por más precisión de cálculo que se pueda tener, los resultados están sujetos a cierto margen de error por la medición implementada.

Asimismo, las mediciones que deberían ser realizadas en una situación de aire libre, no pueden respetar todas las exigencias, principalmente por características del recinto. Esto ata a la experimentación a la posibilidad de comparar el transductor sin gabinete dentro del recinto, con el transductor en gabinete sintonizado, también dentro del recinto. Esta situación dificulta el análisis de estos componentes en interacción con otros lugares y su comparación con experimentación en cámara anecoica o aire libre.

En los casos que presentan modificaciones al diseño original del gabinete sintonizado, se elige mostrar la información en modo comparativo, con el fin de observar variaciones en la respuesta del sistema, siempre partiendo de una referencia. Como el parlante elegido y el sistema presentado son un diseño para amplificación de baja frecuencia, la mayoría de las curvas de impedancia analizadas están limitadas en un rango de 200 Hz, donde se presenta la mayor diferencia apreciable y donde será probablemente limitado el uso de esta caja acústica. En el caso de las transferencias, se limita en 1 KHz, que es un límite considerable, teniendo en cuenta que la diferencia importante frente a cada cambio será en baja frecuencia, por debajo de ese límite.

Todas las mediciones de respuesta en frecuencia fueron realizadas en modo transferencia, con el beneficio de tener independencia de la señal de prueba, ya que se compara la señal de referencia con la de prueba, atribuyéndole a esta última toda la alteración de la señal de salida del software. Otro beneficio de este método es la medición en condición de fase mínima: todo retardo se le atribuye al sistema, no a la electrónica involucrada.

La elección de la posición del micrófono para las mediciones acústicas responde principalmente a una decisión tomada como solución de compromiso. La situación de medición se da en simultáneo con otro grupo en el mismo lugar, por lo que es necesaria una medición cercana al altavoz para evitar contaminación sonora de mediciones próximas. Las mediciones cercanas intentan aislar cada componente medido del resto de la cadena, por eso se acerca tanto el micrófono a la fuente, para que la señal sea máxima. En forma adicional, el hecho de realizar una medición cercana hace que se mida una porción del diafragma o del port y no el sistema completo, pero da resultados más claros que una medición lejana por los efectos mencionados. El gabinete se posiciona en el borde de la mesa de trabajo, con el fin de evitar



posibles reflexiones sobre la superficie que afecten la medición.

Tal como se logró en el trabajo anterior de la materia, los parámetros de Thiele-Small fueron sencillamente obtenidos gracias a las facilidades del software utilizado y su breve circuito asociado. Este conexasiónado también permitió medir las curvas de impedancia en cada configuración de gabinete en forma veloz y precisa, obteniendo valiosa información en poco tiempo. En todos los parámetros se presentan diferencias con las dadas por el fabricante. Esto puede darse por diferentes métodos implementados para la obtención y cálculo, diferencia en las condiciones de medición, y también diferencia en el análisis de los resultados. Teniendo en cuenta la poca (por no decir nula) información respecto del método aplicado por B&C, puede suponerse que con un enfoque en el aspecto comercial, los resultados hayan sido mostrados en condiciones favorables para el transductor, pero esto no resulta más que especulación ya que la empresa no lo informa. Es imposible entonces en esta situación poder determinar si los resultados que responden mejor al comportamiento del transductor son los medidos en esta experiencia, los dados por el fabricante o ninguno de los dos.

Como en toda curva de impedancia de altoparlantes al aire libre, se ve que con la frecuencia tendiendo a 0 Hz, el valor se sitúa cerca de  $R_e$  como es esperable, para este parlante analizado en 5.2 ohm y también se observa el mínimo de las curvas, aquí alrededor de 250 Hz. En todos los puntos donde la curva no tiene desarrollo regular, puede haberse dado interferencia en la medición, generando ese trazo, tanto eléctricas, mecánicas o acústicas.

La Figura 4 compara la impedancia del transductor libre con su funcionamiento en gabinete ventilado. Como es de esperar, se observa la generación de dos máximos de magnitud de impedancia en lugar del único que se observa en aire libre. Las anomalías en el trazo de la curva de impedancia probablemente sean dadas por fisuras en el sellado del gabinete o interferencias durante la medición, que afectan el desarrollo regular de la misma. Las filtraciones de aire hacen que se generen cortocircuitos acústicos que afectan el movimiento del sistema electro-mecano-acústico y muestren variaciones en el desarrollo esperable de la impedancia. Se observa que el valor de  $f_s$  aumenta por la compliancia agregada por el volumen de aire encerrado, lo que impone un capacitor en serie al circuito equivalente, también notorio en el corrimiento del valor de  $C_{ts}$ . El otro máximo generado tiene que ver con el diseño de cajas acústicas sintonizadas, donde se combina la acción del resonador de Helmholtz con el accionar del transductor. La sintonización se observa en el punto mínimo entre ambos picos, pero más sencillamente se puede analizar a partir de la Figura 5, donde el

segundo cruce por 0 grados marca la  $f_p$  en 42 Hz aproximadamente. La Figura 7 se muestra también coherente con estos valores, donde se observa en la medición cercana al parlante un gran decrecimiento en la respuesta alrededor de 42 Hz, punto en el que la presión sonora depende en gran medida del gabinete y port, que tienen máxima respuesta. La sumatoria acústica de ambos fenómenos, observable en el trazo del sistema completo, muestra una respuesta coherente en la zona de 40 Hz, ya que nota la sumatoria de la emisión del parlante y la del port, aunque con varias irregularidades. Probablemente, estos problemas sean por la realización de la medición en un recinto no controlado, como fue mencionado al inicio de este apartado, donde el control de modos propios es casi inexistente y afecta las mediciones acústicas, como en este caso. Por este motivo, se realiza el cálculo mostrado en el apartado 5, Figura 20, donde se muestra una aproximación a la respuesta que debería seguir el gabinete en base a las mediciones cercanas de port y parlante. Es sencillo de contemplar a partir de los trazos dados que la respuesta esperada se basa en la combinación de ambos fenómenos, comprobando la teoría estudiada. Es importante destacar que esta sumatoria, para ser válida debería considerar una suma totalmente coherente, ya que no se contempla la variación de fase entre los resultados involucrados, pero de todos modos, su fin es demostrativo, con lo cual el análisis debe tener esa consideración.

El hecho de alargar el tubo de sintonía, tal como fue analizado en la teoría de la materia trae consecuencias en la sintonización del gabinete, como se observa en las Figuras 8 y 9. Se agrega una sección complementaria de 15.4 cm, logrando un total de 25 cm considerando la superposición de secciones. Nuevamente, con el cruce por 0 grados, se observa la nueva sintonización, en este caso en 36 Hz aproximadamente. El primer máximo observado, por comparación se nota de menor magnitud que en el diseño original, pero parece tener más energía en los laterales, con lo que se puede sospechar de una disminución sutil del valor del Q correspondiente. En el segundo máximo de la curva, la magnitud es muy similar al diseño original, y su frecuencia presenta muy poco corrimiento. Nuevamente, la respuesta en frecuencia vista en la Figura 10 presenta irregularidades, con lo cual el resultado de la sumatoria no se corresponde con lo esperado.

En el caso complementario, se analiza el comportamiento sin ningún tubo de sintonía, solamente el agujero del port sobre la tapa del gabinete. En la Figura 11 se observa un cambio más notorio que el caso anterior: ambos máximos de magnitud suben en frecuencia pero cambia la distribución de energía, cambiando de 41 ohm en 28 Hz a 39 ohm en 67 Hz y de 93 ohm en 85 Hz a 77 ohm en 96 Hz. A partir de la Figura 12 que grafica el comportamiento de la fase, se obtiene que la

sintonización está alrededor de 63 Hz. En este caso, se observa que los máximos de magnitud de impedancia son más parecidos que en el caso de tubo alargado mostrado anteriormente. En cuanto a la fase en ambos casos, se acentúa la diferenciación: en el caso sin tubo, el cambio hasta el primer máximo es más paulatino y llega a un valor mínimo menor al presentado en el caso con tubo alargado. En ambos casos, de todos modos, las curvas confluyen en forma asintótica a la curva medida en el gabinete con diseño original en media y alta frecuencia. Esta nueva sintonización se observa claramente en la Figura 13, donde la respuesta del parlante cae más de 6 dB alrededor de 63 Hz y el port tiene máxima respuesta. Una vez más la curva medida a 65 cm tiene afección del recinto, generando una traza no representativa de la suma esperable de ambos fenómenos.

A continuación, se experimenta con el agregado de absorción al gabinete, lo que resulta en poca variación en la respuesta general de impedancia mostrada en las Figuras 14 y 15. Lo que es apreciable es el cambio en magnitud de aproximadamente 10 ohm menos en el caso del agregado de material absorbente y un pequeño cambio en el primer máximo en frecuencia, también con menor magnitud. Esto se debe a la alteración del Q total del sistema por el agregado de absorción, que también transforma al gabinete en forma global. En este caso, la frecuencia de sintonización del port no se altera mucho respecto del diseño original, pasando de 42 a 43 Hz aproximadamente. En la Figura 16 que muestra la respuesta en frecuencia en esta condición, se puede observar que la selectividad del parlante en la zona de  $f_p$  es menor, el ancho de campana es mayor, con una diferencia entre 10 y 12 dB respecto de las frecuencias superiores, donde el sistema depende del parlante y ya no del resonador.

Finalmente, se intenta llevar el diseño del gabinete analizado a una situación de caja cerrada a través de tapar el port de sintonización. La Figura 17 muestra una traza esperable para gabinete cerrado, con un único máximo de magnitud de 84 ohm en 81 Hz. Comprobando la teoría desarrollada en las clases, la frecuencia incrementa respecto de la  $f_s$  propia del parlante de 59 Hz por las variaciones que impone un gabinete cerrado, descriptas anteriormente. Esto se condice con la Figura 18, donde la fase tiene el desarrollo correspondiente a gabinetes cerrados. La transferencia observable en la Figura 19 muestra la respuesta cercana al parlante en comparación con el mismo punto a 65 cm utilizado en mediciones anteriores. Allí se observa que la respuesta del sistema general sigue la trayectoria dada por el parlante en el gabinete, ya que aquí no hay port que tenga influencia. Es evidente también la pérdida en baja frecuencia, esperable en la comparación de gabinete cerrado con el ventilado ya que no hay resonador de Helmholtz que permita extender el rango.

A nivel general, la información más confiable para el análisis de este sistema está dada por las curvas más cercanas al transductor y al port, sobre todo para la observación del comportamiento en baja frecuencia, ya que las mediciones de transferencia tienen mucha influencia de la acústica del recinto. Otro punto importante a tener en cuenta, es que la respuesta en frecuencia medida corresponde al sistema interfaz-amplificador de potencia- gabinete-parlante-recinto-micrófono, con lo que las anomalías medidas pueden atribuirse a casi cualquier factor de la cadena. Se supone de todos modos que el amplificador de potencia, interfaz y micrófono, tienen respuestas en frecuencia que no deberían traer grandes cambios en la señal analizada, con lo que el análisis puede reducirse a gabinete y parlante dentro del recinto.

La simulación mostrada en la Figura 21 evidencia la sintonización del gabinete, también observable en la respuesta en fase en la Figura 22, en 42 Hz como fue analizado anteriormente. También es coherente con la respuesta de impedancia ( $f_p$  se evidencia entre ambos picos de magnitud) y se nota que la sumatoria de la respuesta del resonador de Helmholtz alrededor de 42 Hz con la del parlante, que allí tiene mínima incidencia, dará la respuesta buscada en el sistema completo. Sin embargo, se encuentran varias diferencias entre la simulación y las mediciones: la tendencia en alta frecuencia en la respuesta de impedancia, es con mayor crecimiento en la simulación que en el resultado medido, pero se evidencian picos de menor magnitud en la simulación. También se evidencia un comportamiento irregular en la respuesta en frecuencia simulada, alrededor de 450 Hz que puede corresponderse con la respuesta observada alrededor de 350 Hz en la Figura 20 correspondiente a la respuesta en frecuencia calculada.

Se evidencia al seguir las indicaciones del programa el cambio de sintonización, tanto en la respuesta en frecuencia y de impedancia mostradas en la Figura 23, como la respuesta en fase mostrada en la Figura 24. Comparando ambas simulaciones, como es esperable, el ancho de banda de funcionamiento es menor en el último caso, con una respuesta más uniforme en amplitud (también con mayor nivel) y moviendo el comportamiento irregular a 600 Hz aproximadamente que puede deberse a simulación del accionar del tubo de sintonización y sus armónicos superiores. Otra diferencia apreciable es la magnitud de la impedancia; al seguir las indicaciones del programa, ambos picos de respuesta son más distintos en magnitud, ya que  $f_p$  se aleja de  $f_s$  y eso hace que la distribución de impedancia en función de la frecuencia varíe. Ese mismo fenómeno se refleja en la evolución de la fase, comparando las figuras 22 y 24 en el trazo de fase impedancia en frecuencias menores a  $f_s$ .

## 7. CONCLUSIONES

Se logró obtener en forma exitosa los parámetros determinados por Thiele y Small para altavoces en baja señal. Al implementar métodos estandarizados, es posible llegar a un punto de comparación con los fabricantes, que se asume que implementan experimentos similares.

Se pudo evidenciar la influencia del gabinete sintonizado en la extensión de respuesta en baja frecuencia por el accionar combinado del resonador de Helmholtz de la caja acústica con el parlante en gabinete. Sin embargo, en octavas superiores a  $f_p$  se obtuvo muy poca claridad respecto del funcionamiento del gabinete en el espectro audible, posiblemente por errores en la medición realizada. Sin embargo, al analizar un gabinete cuyo diseño y uso será en refuerzo de baja frecuencia, no es tan relevante su comportamiento en media y alta frecuencia. En caso de sistemas de rango extendido, serán multi-vía y habrá otra parte del sistema que se encargue de esa reproducción, no el gabinete analizado.

Se logró observar cómo influye en la sintonización la variación de propiedades físicas del tubo asociado al port y absorción en el gabinete, en comparación con la referencia del diseño original de la caja acústica en cuestión. Más allá de que hayan varias formas de variar la frecuencia de sintonización, cada una lleva asociadas cambios en fase y magnitud de impedancia que repercuten en la respuesta en frecuencia del sistema y su  $Q$ . Esto también influye en la zona de transición entre el accionar del gabinete y del parlante, donde se suele buscar una transición suave, sin cambios sustanciales de amplitud en función de frecuencia.

Se demostró la practicidad de utilizar software de simulación, que además analiza el comportamiento de los componentes utilizados y sugiere al usuario correcciones en su diseño. Sin embargo, como en este caso, las opciones brindadas, pueden dar una respuesta que no sea necesariamente mejor que la analizada. En este caso se debería tomar una decisión de diseño, si extender el rango con mayor variación en la respuesta en frecuencia o si tener menor rango de respuesta pero con amplitud constante.

Según recomendaciones de la cátedra [1], por el  $Q_{ts}$  medido, para este altavoz el gabinete ideal sería del tipo sintonizado, con lo cual el gabinete diseñado para este transductor es acorde, al menos en topología.

## 8. REFERENCIAS

[1] Ruffa, Francisco; Sacerdoti, Eduardo. Apunte de la cátedra Electroacústica II, perteneciente a la carrera Ingeniería de Sonido, de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. (2017)

[2] Small, Richard H. “*Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis*”. Journal of the Audio Engineering Society, Junio 1972.