

TRABAJO PRÁCTICO 1: MEDICIÓN DE GABINETES CERRADOS

JONATHAN D. FREIDKES ¹

¹ 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 en estado libre y montado en un gabinete cerrado. Se miden inicialmente los parámetros de Thiele-Small con el parlante libre, sin gabinete, se obtiene la curva de impedancia correspondiente para luego comparar con la medida en la caja. Asimismo, se obtiene la respuesta en frecuencia del parlante en el gabinete cerrado y finalmente se simula el gabinete con software especializado para comparar todos los casos.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una primera finalidad de este trabajo consiste en conocer experimentalmente los parámetros definidos por Richard Small y Neville Thiele para especificar parlantes en funcionamiento con baja señal. Estos descriptores son de utilidad a la hora de comparar distintos transductores y realizar un diseño de gabinete acústico con esos componentes.

En particular se mide frecuencia de resonancia del altoparlante (f_s), resistencia eléctrica de la bobina a corriente continua (R_e), máximo desplazamiento (X_{MAX}) y superficie efectiva de radiación (S_d). Mediante estos se puede calcular Q_{es} , Q_{ms} , Q_{ts} , volumen acústico de la suspensión (V_{as}), rendimiento (η), Inductancia de bobina (L_e) y motor electromecánico (BI), entre otros datos.

Como se ha demostrado en las prácticas de Electroacústica I, una de las formas más efectiva de obtener velozmente los parámetros de Thiele-Small es a través de un simple circuito que funciona para la adquisición de datos con el software LIMP. Es por eso que se opta por este método y se conoce que los resultados obtenidos son confiables y servirán para caracterizar el altavoz.

Otra de las finalidades del trabajo es analizar el comportamiento del altoparlante en interacción con el gabinete acústico. Se conoce por la teoría y análisis la influencia de la caja acústica al parlante en su impedancia y respuesta en frecuencia, con lo cual se busca experimentar para comprobar la magnitud de dichos fenómenos.

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 cerrado para el montaje de un parlante trae varios beneficios que solucionan problemas propios del transductor en campo libre. Principalmente separa ambas caras del altavoz, mejorando la cancelación que se da por diferencias de polaridad para ciertas frecuencias, sobre todo bajas. Además se genera un volumen de aire encerrado que hace las veces de compliancia e impone un capacitor en serie al circuito equivalente. En cuanto a los parámetros Thiele-Small más importantes, el hecho de agregar una caja cerrada hace que cambie f_s del transductor y modifica el comportamiento del Q_{ts} del sistema completo. El pico mostrado en la curva de impedancia generalmente sube en frecuencia, pero baja en magnitud, por lo cual el movimiento será con menor velocidad alrededor de la frecuencia propia del sistema.

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.
 η_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 2 canales de entrada y 2 de salida.
- Altoparlante Edifier ET132-1 de 4 ohm.
- Gabinete Edifier ventilado, port cerrado con masilla.
- Amplificador de potencia Peavey.
- Resistencia R_{lim} comercial 220 Ω .
- Micrófono de medición Earthworks con soportes.
- Cableado de señal balanceada y desbalanceada.
- Macbook pro con software de simulación de gabinetes.

4. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

4.1. Método con software LIMP

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

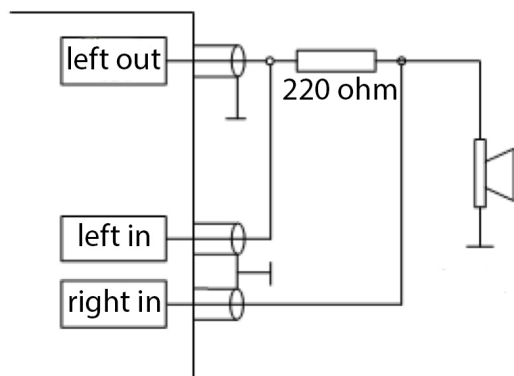


Figura 1: Esquema de conexionado para medición con software LIMP.

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 sus masas son puestas en cortocircuito. 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.

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.

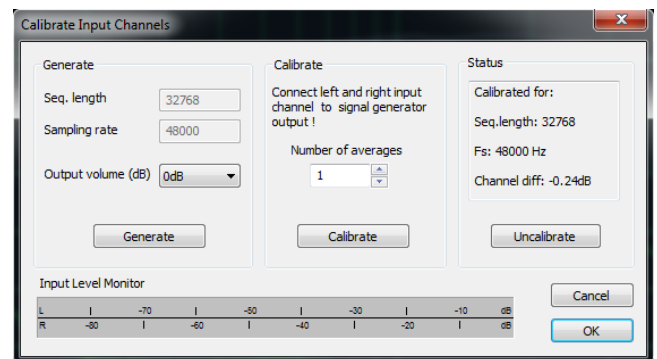


Figura 2: Calibración del sistema en LIMP.

Se elige trabajar comparando ambos modos de generación de señal, tanto con el modo *step sine sweep* como con el modo con señal de ruido rosa, para observar los cálculos con ambos procedimientos. Así el software realiza el barrido y las mediciones correspondientes para generar la curva de impedancia para el sweep. En el caso del ruido rosa lo realiza en forma casi instantánea hasta que el usuario pause.

Para la obtención de todos los parámetros Thiele-Small es necesaria la implementación del método de masa agregada. Este requiere el agregado de peso al diafragma, lo que genera una nueva curva de impedancia del parlante con la f_s correspondiente. Por comparación de ambas curvas y los valores Thiele-Small, el programa obtiene los parámetros restantes del altavoz sin la masa adicional. En el caso de este software, únicamente es necesario especificar el peso de la masa agregada para la realización del cálculo, que en este experimento fue de 10.5 gramos.

Para optimizar el tiempo en la medición se decide utilizar señal de ruido rosa en las mediciones posteriores a la correspondiente a campo libre.

4.2. Método con Smaart

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

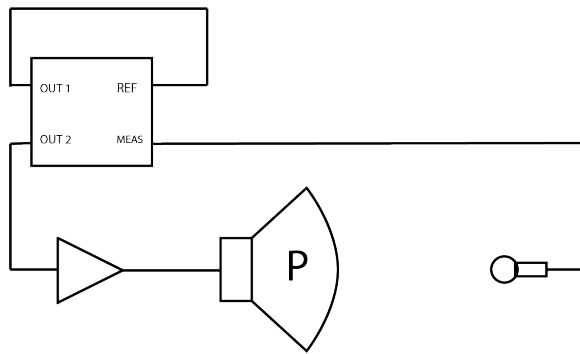


Figura 3: Conexión con software Smart.

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, recinto de medición, micrófono de medición, cableado e interfaz de audio.

Con el micrófono a aproximadamente 18 cm del altavoz, se mide la respuesta en frecuencia del transductor y su fase correspondiente.

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} , R_{ms} , V_{as} , S_d y L_e , valores obtenidos a través de la medición con LIMP. De acuerdo al tipo de caja pedida por el usuario, el programa calcula en base a 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 generan nuevas simulaciones más allá de lo solicitado para

este trabajo, con el fin de observar el comportamiento si se siguieran las recomendaciones dadas por el software para el transductor analizado.

5. RESULTADOS

Se muestra en la Figura 4 la comparación de curvas de impedancia obtenidas con las distintas señales utilizadas para el parlante en estado campo libre.

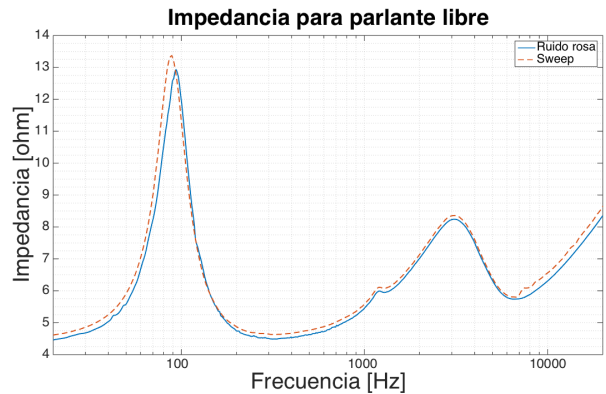


Figura 4: Curvas de impedancia para parlante en campo libre con distintas señales de excitación. Trazo continuo azul para la señal de ruido rosa y trazo naranja discontinuo para el sweep.

En la Figura 5 se muestra la respuesta en fase correspondiente a las mismas mediciones de impedancia del parlante en campo libre, también con ambas señales de prueba.

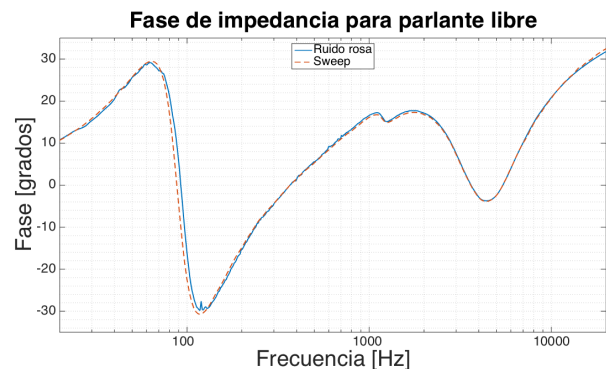


Figura 5: Curvas de fase de impedancia para parlante en campo libre con distintas señales de excitación. Trazo continuo azul para la señal de ruido rosa y trazo naranja discontinuo para el sweep.

Como fue mencionado en el apartado 4.1 de este trabajo, para la obtención de todos los parámetros Thiele-Small, es necesario implementar el método de masa agregada. Se muestran las curvas con y sin masa agregada en la Figura 6.

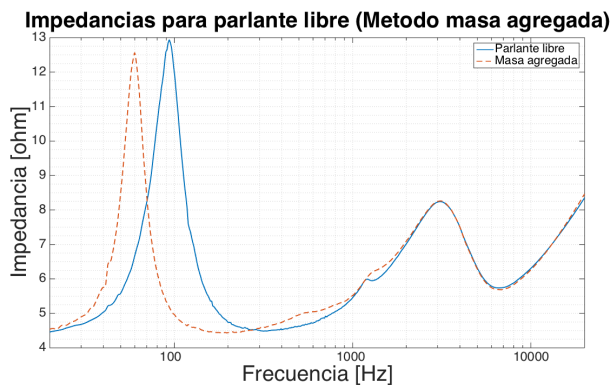


Figura 6: Curvas de impedancia para parlante con y sin masa agregada. Trazo continuo azul para el parlante en campo libre y trazo naranja discontinuo para el método de masa agregada.

El cálculo del software permite obtener los parámetros Thiele-Small del parlante analizado, que se muestran en la Tabla 1.

f_s	91.49 Hz
R_e	4 ohm
L_e	27.91 uH
R_{min}	2.9 ohm
Q_{ts}	0.8
Q_{es}	1.17
Q_{ms}	2.54
M_{ms}	7.77 g
R_{ms}	1.818828 kg/s
C_{ms}	0.000382 m/N
V_{as}	2.93 l
S_d	73.9 cm ²
Bl	4.032607 Tm
$L_p (2.83V/1m)$	88.13 dB

Tabla 1: Parámetros Thiele-Small para Edifier ET132-1 con software LIMP.

Luego de posicionar el parlante en el gabinete cerrado, se obtiene su nueva curva de respuesta de impedancia. Se muestra en la Figura 7 en comparación a la curva obtenida con el parlante en campo libre.

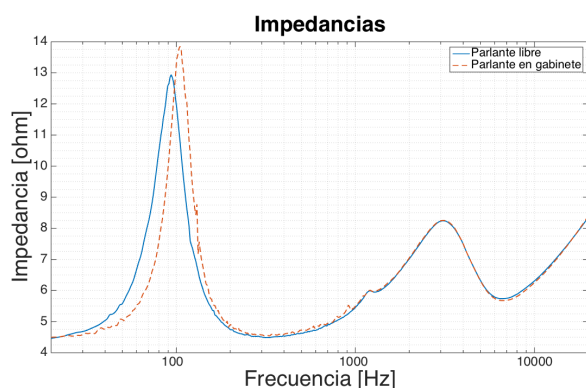


Figura 7: Curvas de impedancia para parlante en campo libre y en gabinete (con promediado lineal). Trazo continuo azul para campo libre y trazo naranja discontinuo para gabinete.

Del mismo modo en la Figura 8 se visualiza la respuesta en fase correspondiente al parlante en campo libre y en gabinete.

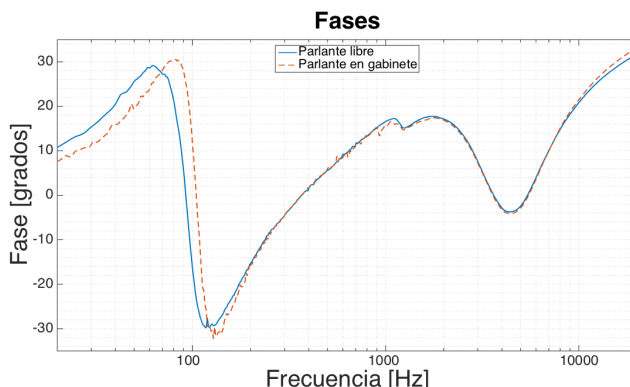


Figura 8: Curvas de fase de la impedancia para parlante en campo libre y en gabinete. Trazo continuo azul para campo libre y trazo naranja discontinuo para gabinete.

Los valores obtenidos por el programa se muestran en la Tabla 2.

Z_{MAX}	13.85 ohm
Z_{MIN}	4.54 ohm
f_s nueva	105 Hz

Tabla 2: Cambios en impedancia por gabinete obtenidos con software LIMP.

El gabinete dado para analizar es un sistema de dos vías, con crossover dentro del gabinete de difícil acceso, y con cables soldados al parlante. Esto imposibilita la medición del altavoz solo, con lo que la señal dada pasa primero por el filtro y también es reproducida cierta parte del espectro por el tweeter. Como el fin de la medición acústica es analizar el parlante y su comportamiento en gabinete, se mide la respuesta en frecuencia de todo el conjunto y luego se tapa el frente del tweeter para intentar observar el efecto del parlante solo. Se muestran en la Figura 9 las distintas mediciones de respuesta en frecuencia.

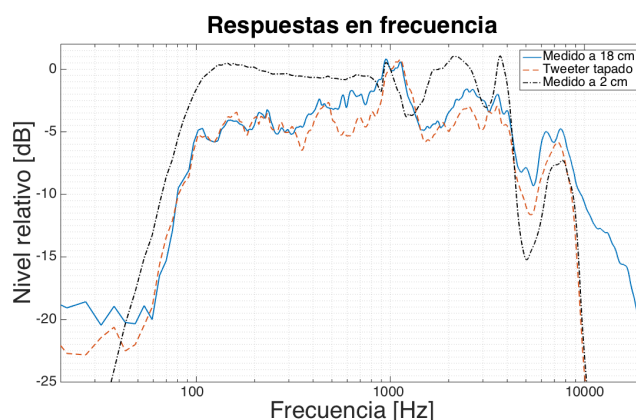


Figura 9: Respuesta en frecuencia del parlante en gabinete. Trazo continuo azul para sistema completo a 18 cm, trazo naranja discontinuo para transductor de alta frecuencia tapado, trazo negro discontinuo con punto para medición a 2 cm del parlante.

Para sumar al análisis, se observa en la Figura 10 la respuesta de fase obtenida para el sistema completo a 18 cm.

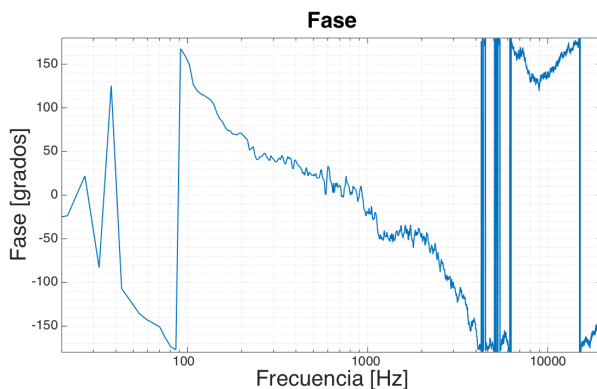


Figura 10: Respuesta de fase para gabinete completo medido a 18 cm.

La Figura 11 muestra un esquema del gabinete utilizado y sus medidas. Se calcula un volumen de 10.25 litros.

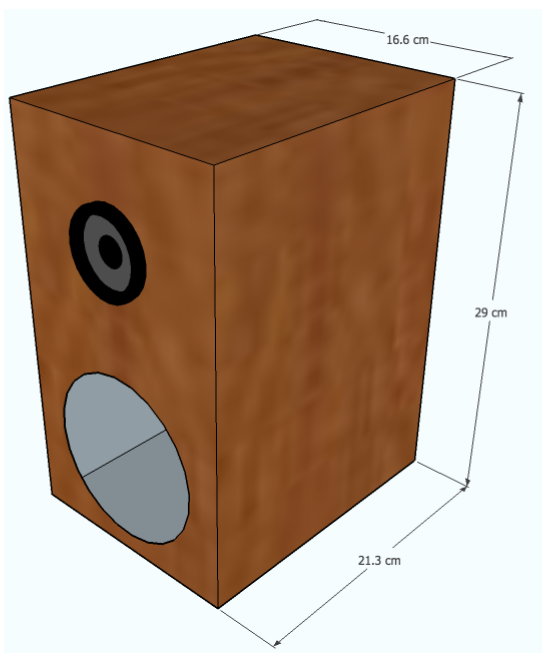


Figura 11: Esquema del gabinete medido.

En cuanto a la simulación llevada a cabo, el programa inicialmente detecta un valor de Q_{ts} demasiado alto para el diseño de un gabinete cerrado, lo que alerta para cambiar el eje del diseño. Como el objetivo es ver el comportamiento de gabinetes cerrados, se desestima inicialmente la sugerencia. Por lo tanto, se sugiere un gabinete cerrado de 13.39 litros.

Se observa en la Figura 12 las curvas de respuesta en frecuencia y de impedancia para el gabinete cerrado simulado.

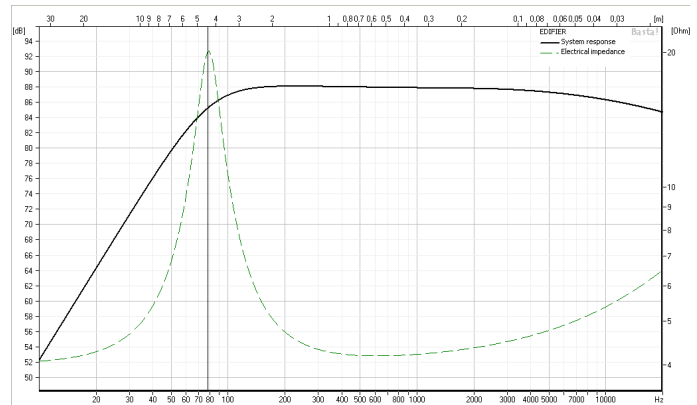


Figura 12: Respuesta en frecuencia y de impedancia para simulación de caja cerrada. En trazo continuo negro la respuesta del sistema completo y en verde discontinuo la impedancia.

La Figura 13 muestra la respuesta de fase del sistema y de la impedancia resultante del altavoz.

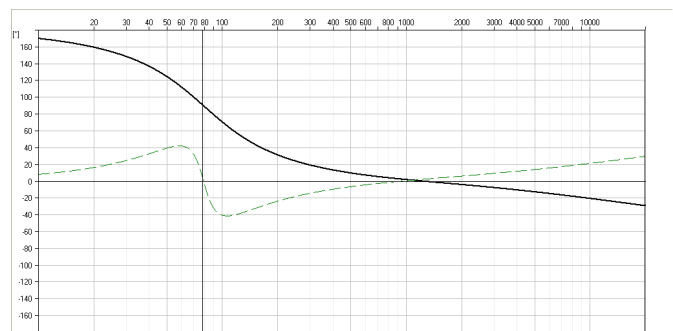


Figura 13: Respuesta de fase para sistema completo y de impedancia para simulación de caja cerrada. En trazo continuo negro la respuesta del sistema completo y en verde discontinuo la impedancia.

En forma adicional, considerando la alerta del software, se diseña también un gabinete ventilado para el mismo transductor, con el fin de comparar ambas situaciones. En este caso, el programa sugiere un port con sintonización en 48.03 Hz con $Q = 10$. Las Figuras 14 y 15 muestran la comparación de los resultados de la simulación para la impedancia del sistema y su fase correspondiente, tanto en caja cerrada como en gabinete ventilado.

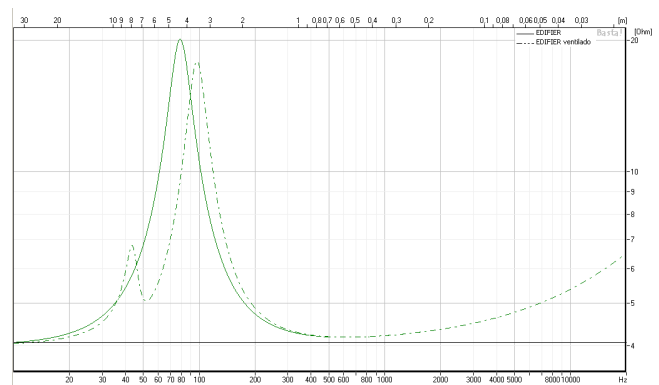


Figura 14: Respuesta de impedancia para gabinete cerrado y ventilado. En trazo continuo gabinete cerrado y discontinuo ventilado.

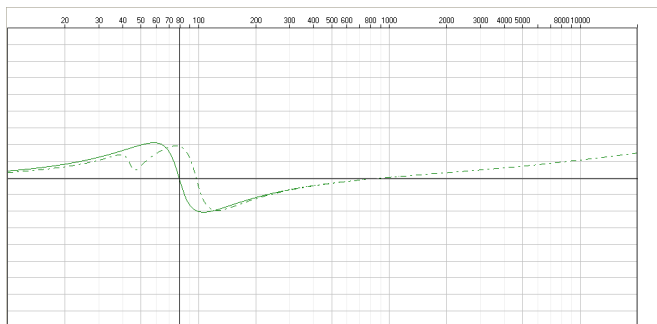


Figura 15: Respuesta de fase para transductor en gabinete cerrado y ventilado. En trazo continuo gabinete cerrado y discontinuo ventilado.

Para graficar la diferencia en forma más clara, la Figura 16 muestra la comparación de las respuestas en frecuencia simuladas.

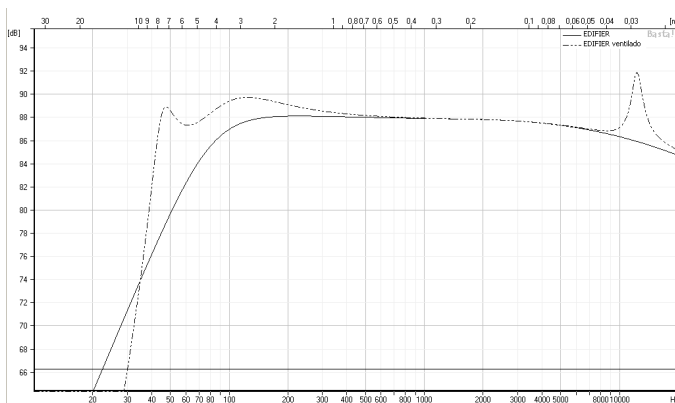


Figura 16: Respuesta en frecuencia para transductor en gabinete cerrado y ventilado. En trazo continuo gabinete cerrado y discontinuo ventilado.

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 campo 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 cerrado, 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 campo libre.

Por falta de experiencia en este tipo de mediciones, se obtuvieron los parámetros de Thiele-Small sin medir ni introducir como dato al programa el valor de R_e previo al cálculo. El programa asume el valor de 4 ohm, y al finalizar la experiencia se comprobó con un multímetro UNI-T UT61D que el valor real del altavoz es de 3.6 ohm.

Aquí se plantea un primer error en las mediciones que afectará a todo el trabajo completo, ya que el corrimiento de este valor supera el 10% de diferencia con el planteado por el software. Esto genera que el cálculo de los parámetros que sirven de punto de partida para la simulación, puedan ser erróneos desde el comienzo. Sin embargo, el valor está dentro de un orden aceptable para un transductor que dice ser de 4 ohm. De todas formas, el programa obtiene satisfactoriamente los parámetros Thiele-Small que luego serán aplicados en otras partes del trabajo.

Al utilizar dos señales distintas para obtener la curva de impedancia del parlante, se obtienen dos resultados con variaciones entre sí. La utilización de la señal *step sine sweep* mejora la relación señal-ruido al momento de la medición. Al emitir una señal senoidal escalonada de frecuencia variable, en cada uno de los pasos, la señal será de banda angosta, mientras que el ruido de banda ancha, obteniendo un valor *SNR* mejor en cada momento de la medición. Sin embargo, esto supone un tiempo de medición mayor, ya que la señal de ruido rosa genera todo el espectro en simultáneo y obtiene la curva completa de respuesta de impedancia en forma casi instantánea. Al observar el rango de frecuencias analizado, las curvas no se separan más que 0.5 ohm, con lo cual puede ser considerada despreciable la diferencia en la mayor parte del espectro. Se notan diferencias alrededor del primer pico de resonancia: el ruido rosa sitúa f_s alrededor de 92 Hz con magnitud cercana a 12.8 ohm, mientras que en el sweep f_s está entre 88 y 89 Hz, con magnitud 13.3 ohm. Para la mayoría de los análisis esta diferencia no sería apreciable, pero al comparar ambas señales, es complicado determinar cuál tiene mayor exactitud. Se puede asumir que el valor más cercano al real es la dada por el sweep, ya que la señal será más fácil de discriminar del ruido, incluso alrededor de f_s que es uno de los puntos más críticos del análisis.

Como en toda curva de impedancia de altoparlantes, se va que con la frecuencia tendiendo a 0 Hz, el valor de impedancia se sitúa cerca de R_e como es esperable. También se observa el mínimo de la curva, en este caso alrededor de 300 Hz y un nuevo pico en 3 KHz, probablemente por una nueva resonancia del sistema. En todos los puntos donde la curva no tiene desarrollo regular, puede haberse dado interferencia en la medición, generando ese trazo.

En la medición de fase de la impedancia, la comparación de ambas curvas hace notar que el corrimiento entre ambas nunca supera 1 o 2 grados, con lo que la diferencia entre ambas señales de prueba se vuelve despreciable.

En la implementación del método de masa agregada, se nota su validez en el corrimiento de f_s que pasa de un valor inicial de 91.49 Hz a 105 Hz. Los cambios esperables en este método están entre 10 y 20%, con lo que habiendo logrado un 13% de diferencia, se considera válido.

La Figura 7 compara la impedancia del transductor libre con su funcionamiento en gabinete cerrado. Como es de esperar, el volumen de aire en el gabinete hace las veces de compliancia, generando un capacitor en serie al circuito equivalente. Esto baja C_{ms} y hace que suba f_s del sistema completo parlante-gabinete. Se nota en el corrimiento de frecuencia y también es visible en la Figura 8, donde la respuesta de fase tiene un comportamiento que sigue este cambio. Se observa un crecimiento en la magnitud en la banda cercana a la resonancia, lo que es llamativo ya que la compliancia debería bajar la velocidad dentro del gabinete y hacer que se frene el movimiento del altavoz allí. Eso posiblemente haría que en f_s baje la magnitud de la impedancia.

Al combinar la acción del gabinete cerrado con el parlante, cambia el Q_{ts} del sistema, dándose un aumento del mismo, ya que el sistema parece estar más sintonizado alrededor de f_s (el crecimiento del pico parece ser más pronunciado), lo que llevaría a mayor resonancia y explica el incremento de la magnitud. Las anomalías en el trazo de la curva de impedancia probablemente sean dadas por fisuras en el sellado del gabinete. Es necesario considerar que el panel de conexión del gabinete y el port del mismo (el gabinete analizado es de diseño sintonizado, no cerrado) fueron tapados con masilla, lo que puede haber dado lugar a filtraciones en el gabinete. Eso hace que se generen cortocircuitos acústicos que afectan el movimiento del sistema electro-mecano-acústico.

Se puede observar en la Figura 9 las comparaciones de las distintas mediciones de transferencia. Un beneficio de medir transferencia es la independencia que se genera 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. 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 otros grupos en el mismo lugar, por lo que es necesaria una medición cercana al altavoz para evitar contaminación sonora de mediciones próximas. Por otro lado, el gabinete analizado es dos vías con el sistema de crossover incorporado dentro de la caja y tweeter, lo que determina la realización de la medición en el eje acústico, que se supone como promedio de los centros de ambos transductores. En forma adicional, el hecho de realizar una medición cercana hace que se mida una porción del diafragma y no el sistema completo. 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.

La comparación de la medición con tweeter libre y tapado permite intuir la banda de influencia del transductor de alta frecuencia. Al observar ambas curvas, se diferencian desde 2 KHz hasta 10 KHz, donde el tweeter tapado casi no aporta presión sonora. Alrededor de 4 KHz las curvas se juntan, lo que puede ser interpretado como un error en la medición ya que sería lógico esperar que la tendencia siguiera con la misma diferencia presentada en 2 KHz o que aumente, pero no que se junten ambas respuestas. Entre 500 y 900 Hz, ambas curvas tienen mucha diferencia, pero es probable que sea un error en la medición ya que es esperable el cruce de los transductores por encima de estos valores, según lo discutido con los docentes. Finalmente, la medición muy cercana al parlante, en trazo negro interrumpido con punto da una curva muy clara de crecimiento en baja frecuencia y resultados en alta frecuencia que no deben ser considerados, por estar muy por fuera del eje acústico. Es probable que la cercanía elimine el efecto sobre la medición de los modos propios del recinto y aumente la respuesta en baja frecuencia, incluso dando un resultado exagerado. Sin embargo, se observa con claridad el comportamiento del sistema alrededor de f_s , donde la respuesta en frecuencia comienza a ser regular hasta 1 KHz. En la octava de 50 a 100 Hz se observa un crecimiento de 18 dB aproximadamente, lo que da una idea de que este gabinete no reproducirá en forma correcta señales muy por debajo de su f_s como es esperable en estos diseños. Para subsanar esto, sería necesario un gabinete ventilado que extienda el rango de respuesta por debajo, con su resonador de Helmholtz aportando energía en baja frecuencia.

Las irregularidades en la respuesta en frecuencia sobre el eje acústico pueden estar dadas por influencia del recinto, reflexiones no esperadas o errores en el procedimiento. También podría suavizar esa curva un promediado de los datos por bandas de

fracción de octava, simplificando la visualización de la información y suavizando la curva.

Es probable así que la información más confiable para el análisis de este sistema esté dada por la curva más cerca al transductor, sobre todo para la observación del comportamiento en baja frecuencia. Otro punto importante a tener en cuenta, es que la respuesta en frecuencia medida corresponde al sistema amplificador de potencia-crossover-gabinete-parlante-recinto-micrófono, con lo que las anomalías medidas pueden atribuirse a casi cualquier factor de la cadena. La respuesta en baja frecuencia también puede haberse visto afectada por deficiencias en el tapado del puerto de sintonía del gabinete para transformarlo en cerrado.

La Figura 10 muestra la respuesta en fase para la medición a 18 cm sobre el eje acústico. Tiene una evolución irregular desde 20 hasta 40 Hz, que responden a interferencias en la medición, el transductor ni siquiera es capaz de reproducir fielmente ese rango. Entre 90 y 4 KHz la forma es bastante regular, con una rotación de -160 a 160 grados. En alta frecuencia, la respuesta es muy poco controlada, con demasiada rotación, lo que da una idea de errores de medición en esa parte del espectro. Eso se condice con falta de coherencia mostrada por el programa durante la medición en la misma banda, lo que confirma que la medición muy probablemente en esa porción sea irreal.

Al requerir la conversión de ciertas unidades para el diseño de gabinete en el simulador, se puede presentar un primer error en el cálculo. Por otro lado, el software siempre alerta del valor alto obtenido de Q_{ts} para un gabinete cerrado, con lo cual da una idea de que los datos ingresados pueden ser erróneos. Como el sistema en el gabinete subirá el Q_{ts} es recomendable que el parlante tenga un valor propio cercano a 0.7 o menor. En ese sentido, los cálculos del programa proporcionan un volumen de gabinete hasta un 25% más grande que el analizado. Como fue medido en el gabinete real, la Figura 12 muestra un rápido crecimiento entre 50 y 100 Hz, de alrededor de 18 dB y la estabilización de la respuesta por encima de f_s que ronda los 105 Hz en el cálculo. En contraparte, la simulación marca el pico de resonancia cerca de los 80 Hz, muy por debajo de lo medido en campo libre y con gabinete. Toda la curva de impedancia simulada refiere a diferentes frecuencias que las obtenidas experimentalmente. Es difícil determinar si la gran diferencia es dada por errores en las mediciones o problemas en el cálculo de software, pudiendo ser ambas de gran influencia en los resultados tan contrastantes. La respuesta de fase visualizada en la Figura 13 se corresponde con el cálculo del programa para la magnitud de la impedancia, teniendo el cruce por 0 grados en f_s calculada cerca de 80 Hz.

Al considerar la recomendación del programa de diseñar un gabinete ventilado, se evidencian mejoras

en la respuesta general del sistema. La Figura 14 muestra un nuevo pico en la impedancia, correspondiente a la sintonía y su fase respectiva en la Figura 15 muestra la afección del port. Se supone que por la distancia entre f_s y f_p ambos incrementos en magnitud no son iguales. Probablemente de ser más cercanos se verían dos aumentos similares en magnitud. Asimismo, la Figura 16 evidencia la mejora en la respuesta en frecuencia del sistema completo, extendiendo el rango en baja frecuencia por la combinación del resonador (sintonizado en 48 Hz) y del conjunto gabinete-parlante. Extrañamente se genera un incremento de la respuesta en alta frecuencia, cercano a los 12 KHz, que se encuentra difícil de explicar, ya que el port no debería afectar en ese rango de frecuencias, sino que funciona en banda angosta. También se ve en baja frecuencia el efecto generado por el filtro de cuarto orden, donde la pendiente entre 30 y 40 Hz es extremadamente pronunciada.

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. Sin embargo, se debió haber considerado la medición de R_e desde el inicio del experimento para tener valores que respondan al comportamiento real del altavoz analizado.

Se pudo evidenciar la influencia del gabinete cerrado en el corrimiento de f_s y Q_{ts} del sistema resultante y su comportamiento dado por la respuesta en frecuencia alrededor de la resonancia. Sin embargo, fuera de ese rango, se obtuvo muy poca claridad respecto del funcionamiento del gabinete en el espectro audible, posiblemente por errores en la medición realizada.

Es claro que las mediciones realizadas responden al conjunto de parlante, divisor de frecuencias y tweeter (en algunos casos) por la imposibilidad de separar los componentes. De acuerdo a la medición puede que eso tenga mayor o menor peso en los resultados obtenidos.

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 los resultados obtenidos para la impedancia fueron muy diferentes a los experimentados. Esto puede darse por malas mediciones, mal cálculo del software o mala utilización del mismo. De todos modos, pierde validez la comparación de respuesta en frecuencia acústica de un sistema dos vías en condiciones no ideales (con las salvedades aclaradas anteriormente), con la simulación de un software de caja cerrada con un único componente.

A pesar de que no era el objetivo principal del trabajo, se evidenció la diferencia en los distintos tipos de gabinete, tanto cerrado como ventilado para una misma caja acústica, con los mismos componentes.

Según recomendaciones de la cátedra [1], por el Q_{ts} medido, para este altavoz el gabinete ideal sería del tipo baffle infinito. Esto hace sospechar que los parámetros de Thiele-Small hayan sido obtenidos en forma errónea, ya que se partió de un gabinete comercial en funcionamiento. De todos modos ese gabinete puede estar mal diseñado, o mal elegidos los transductores para el mismo.

8. REFERENCIAS

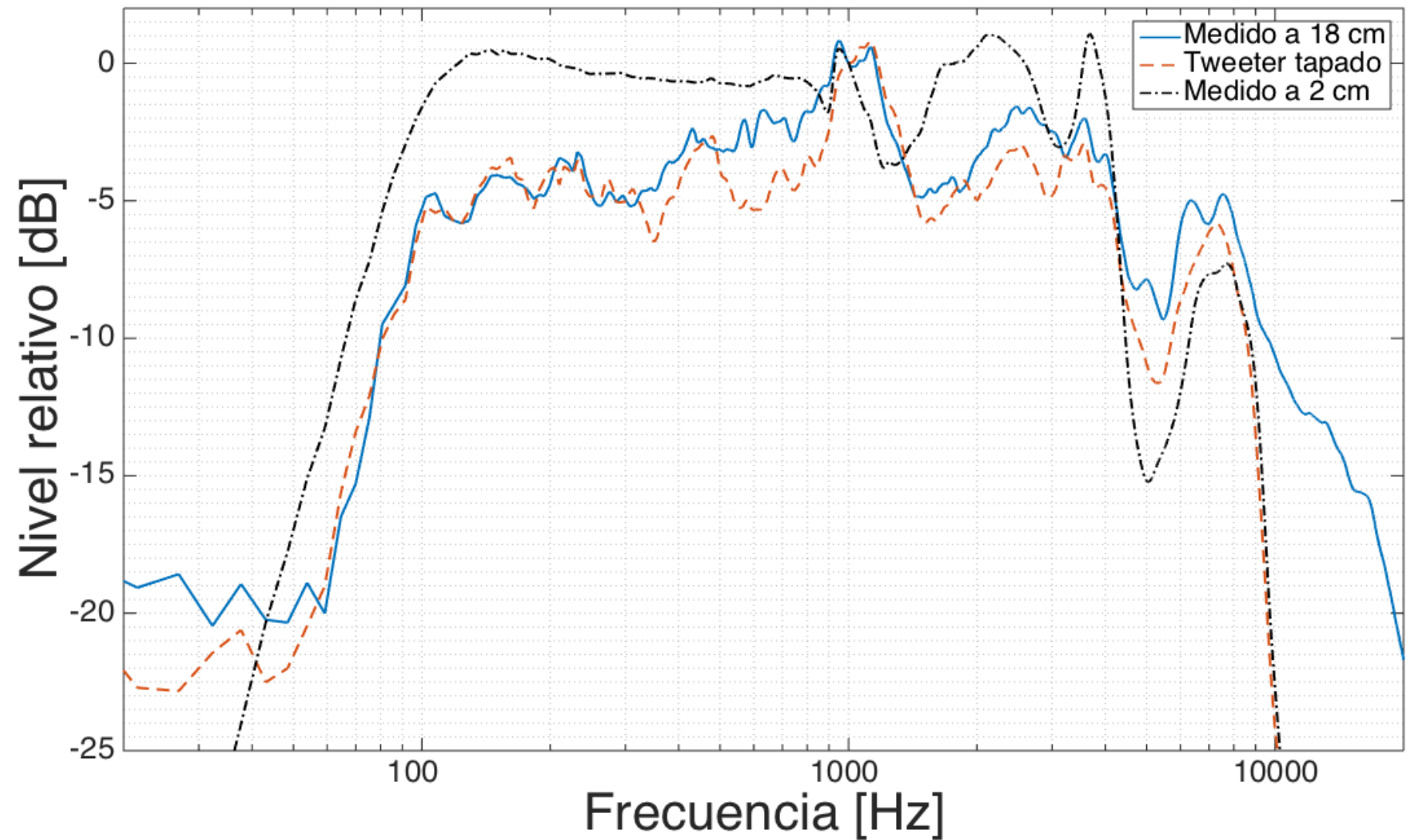
[1] Ruffa, Francisco; Sacerdoti, Eduardo. Apunte de la cátedra Electroacústica II, perteneciente a la carrera Ingeniería de Sonido, de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. (2017)

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

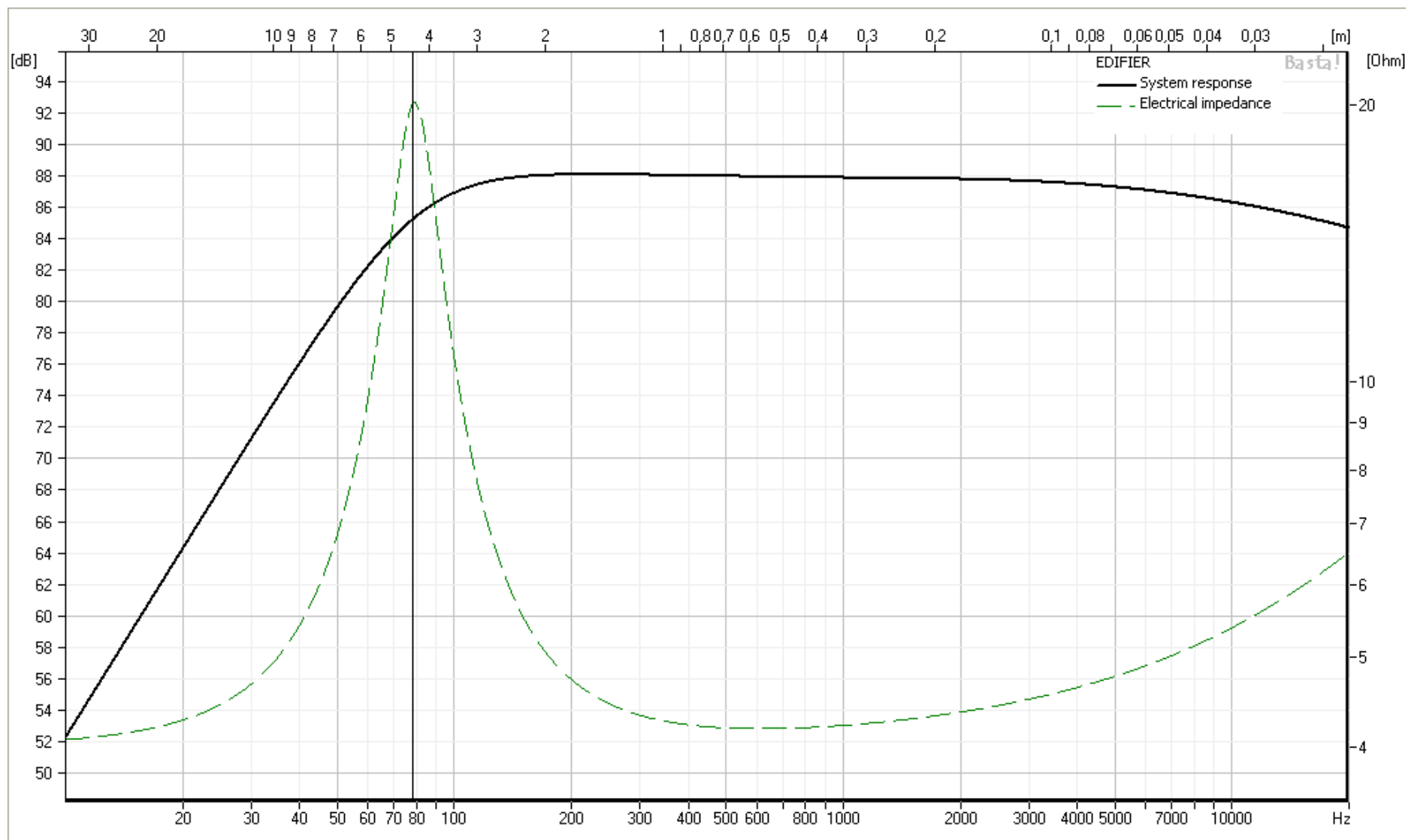
9. ANEXO

9.1. FIGURA 9

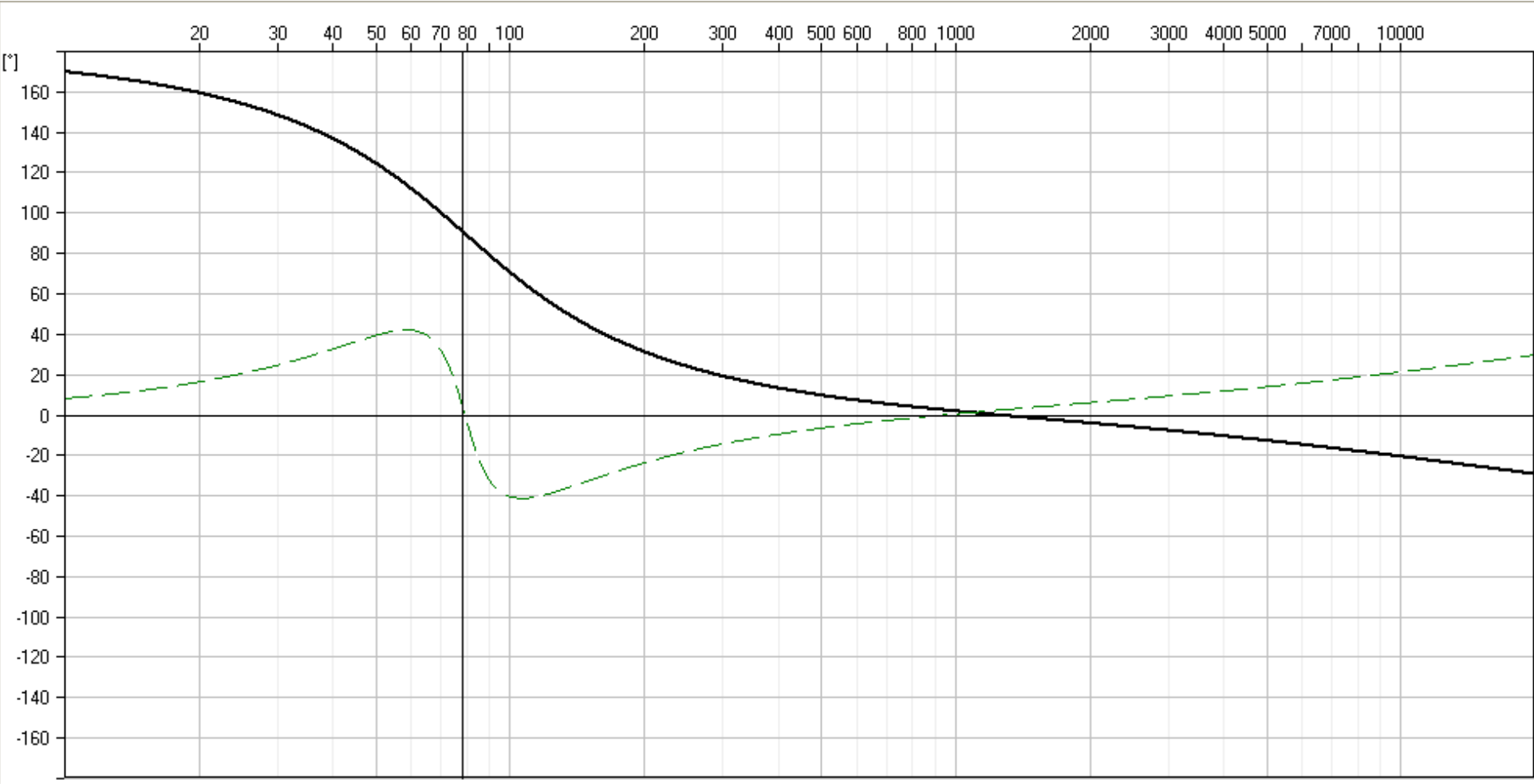
Respuestas en frecuencia



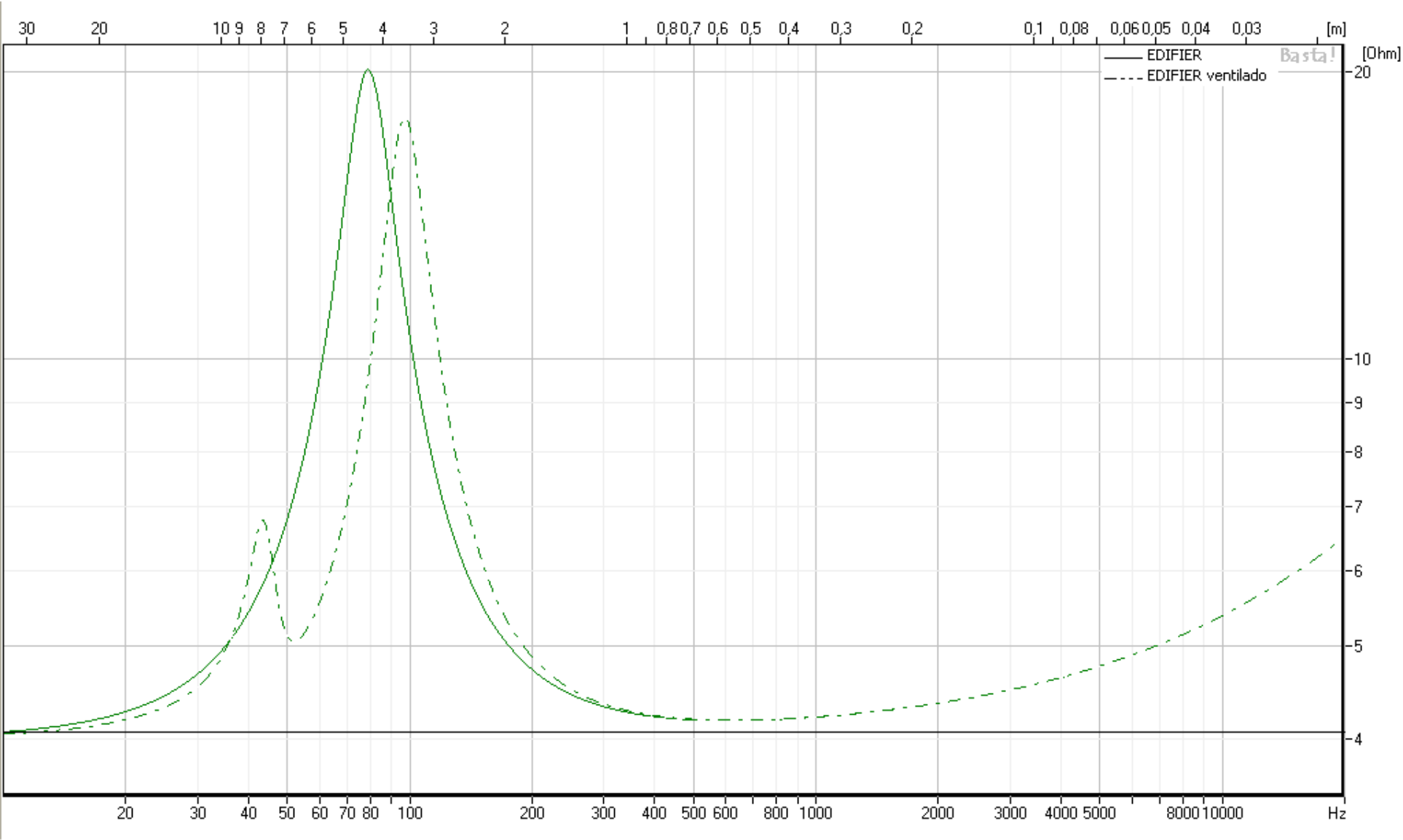
9.2. FIGURA 12



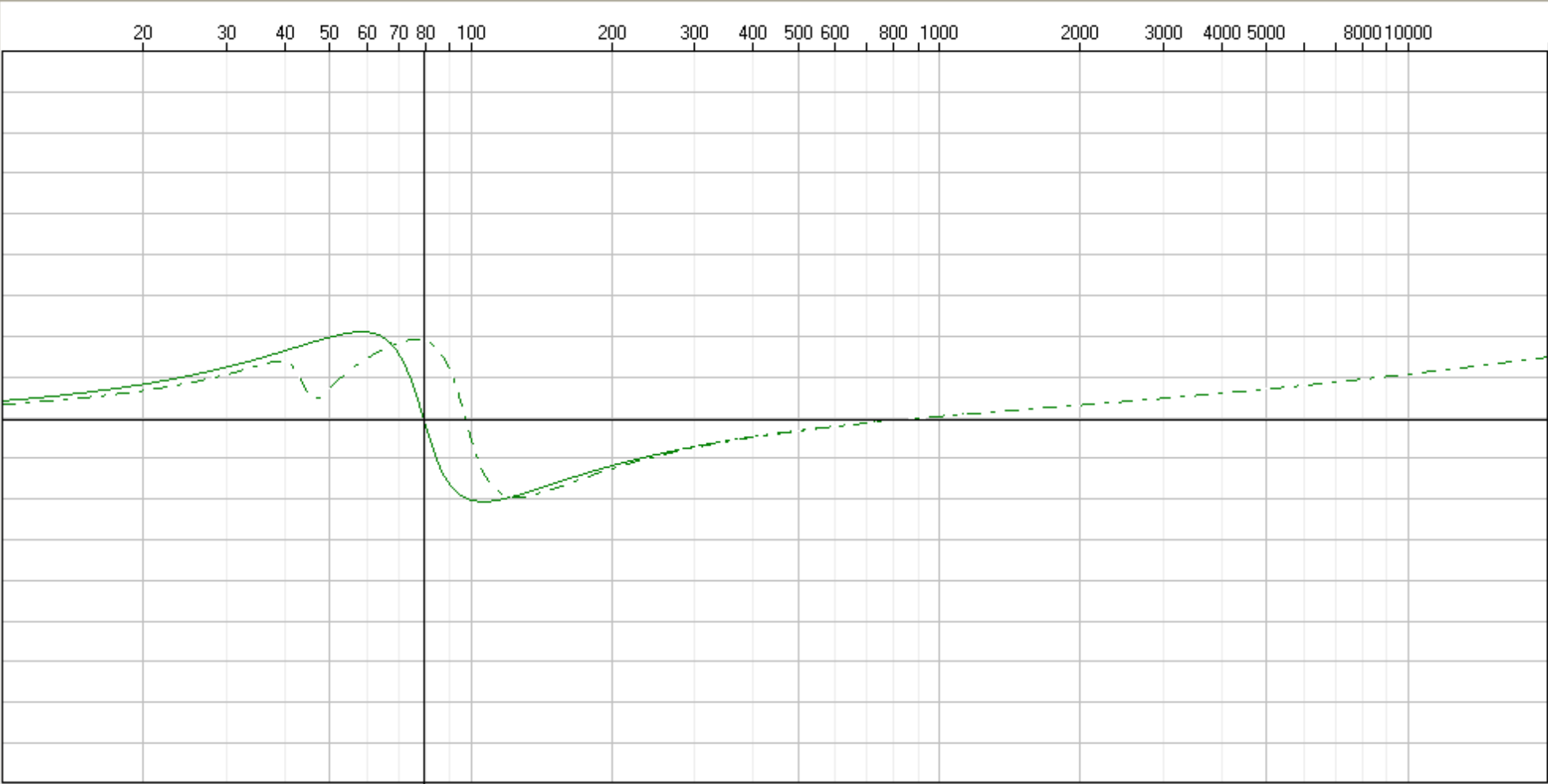
9.3. FIGURA 13



9.4. FIGURA 14



9.5. FIGURA 15



9.6. FIGURA 16

