

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE UN GABINETE ACÚSTICO

Bach Franco¹ y Mezzabarba Tomás²

¹Universidad Nacional de Tres de Febrero
francobach47@gmail.com

²Universidad Nacional de Tres de Febrero
tmezzabarba@gmail.com

Resumen — En el presente trabajo, se desarrolla el estudio del funcionamiento de un gabinete acústico sintonizado mediante el análisis de mediciones acústicas y eléctricas. En primer instancia, se caracteriza el parlante mediante los parámetros de Thiele-Small, para luego en el software Basta! obtener una simulación del sistema con gabinete. Con las mediciones acústicas se implementan técnicas del Dr Keele con mediciones de campo cercano y lejano, para así obtener la respuesta en frecuencia del sistema en condición cuasi-anecoica. Finalmente se comparan las mediciones con las simulaciones y se da una evaluación del sistema estudiado.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente informe se realiza estudio y evaluación de un sistema electroacústico teniendo en cuenta mediciones eléctricas y acústicas del mismo. El objetivo es encontrar la respuesta en frecuencia en condición cuasi-anecoica teniendo en cuenta la metodología propuesta por Dr Keele, para en un posterior análisis, comparar esos resultados con una simulación del sistema. Para la simulación se tienen en cuenta los parámetros de Thiele-Small obtenidos mediante las mediciones eléctricas y por otro lado el software Basta!. Con respecto al análisis de las mediciones acústicas, se utiliza el software ARTA junto con un script de Python para graficar los resultados.

El conjunto de mediciones que se tienen en cuenta en este trabajo para realizar el estudio son: medición de impedancia eléctrica del altoparlante al aire libre con y sin masa agregada, medición de impedancia eléctrica del parlante dentro del gabinete ventilado y cerrado, medición acústica de respuesta al impulso del sistema en un entorno no ideal (campo lejano) y las respuestas al impulso tanto del driver como del port en campo cercano. El sistema medido está formado por un altoparlante de la marca B&C Speakers, en concreto, el modelo 6NDL38-8 y un gabinete de madera, el cual en su interior no presenta más que los cables que conectan a dicho altoparlante con la bornera de salida. En la Figura 1 se puede ver un modelado 3D del sistema a medir y analizar [1].



Figura 1: Modelado 3D del gabinete acústico medido.

2. METODOLOGÍA

2.1. Parámetros de Thiele-Small

En primer lugar, para el cálculo de los parámetros de Thiele-Small, se utilizan las mediciones eléctricas de impedancia. Se comienza midiendo la impedancia del altoparlante al aire libre, de la cual se pueden obtener la frecuencia de resonancia f_s , resistencia eléctrica R_e , inductancia de la bobina L_e y los factores que caracterizan el control de la resonancia Q_{ES} , Q_{MS} y Q_{TS} . Con respecto a los parámetros que caracterizan mecánicamente

al sistema, se realiza una segunda medición de impedancia pero esta vez con masa agregada.

En este caso se agregan 20 gr de plastilina repartidos uniformemente alrededor del cono del altoparlante. Posteriormente con ambas mediciones se procede a obtener el catálogo completo de parámetros a través del software LIMP. Por otro lado, se procede a realizar la primer medición de impedancia (sin masa agregada) pero esta vez con el driver montado sobre el gabinete ventilado y luego sobre el mismo gabinete pero tapando el resonador a fin de poder comparar el funcionamiento del altoparlante en ambos casos y además para poder caracterizar por completo al sistema.

2.2. Simulación

Una vez obtenidos todos los parámetros que permiten caracterizar al sistema se procede a realizar una simulación en el software Basta!, en el cual se tienen en cuenta las dimensiones reales del gabinete tanto externas como internas, así como también las dimensiones del port y del driver, con el fin de poder comparar dicha simulación con la medición acústica.

La Tabla 1 presenta las dimensiones utilizadas para la simulación.

Tabla 1: Dimensiones del sistema

Gabinete - externas	
Alto	22,3 cm
Ancho	22,5 cm
Profundidad	17,5 cm
Diagonal (baffle delantero)	31 cm
Gabinete - internas	
Alto	19,8 cm
Ancho	20 cm
Profundidad	15 cm
Volumen interno	5,9 L
Driver	
Diámetro	13 cm
Port	
Diámetro	4 cm

Una vez simulado el sistema, se analizan las curvas de respuesta en frecuencia, y excursión del driver junto con la velocidad del port en condición de máximo nivel de salida. Además, para acercar la simulación al modelo real se hace uso del *baffle step*, el cual considera la pérdida de energía en baja frecuencia debido a la radiación 4π .

2.3. Respuesta en frecuencia

Con el fin de estudiar la respuesta en frecuencia del sistema completo, se busca realizar una medición cuasi-anecoica, la cual está compuesta por distintas mediciones. En este caso, una medición correspondiente a campo

lejano (Farfield) y dos correspondientes a campo cercano (Nearfield), una para el driver y otra para el port. En conjunto, estas mediciones permiten obtener una caracterización del sistema final despreciando los efectos de la sala en la cual se realizan dichas mediciones. Esta técnica es útil cuándo se mide en recintos no ideales, es decir, donde la sala afecta considerablemente a la medición en campo lejano debido a los modos y/o reflexiones presentes en ella.

Todas las mediciones se realizan en el software ARTA, el cual permite medir y analizar la respuesta al impulso, respuesta en frecuencia, entre otras.

2.3.1. Medición Farfield

La medición de campo lejano se realiza a una distancia de tres veces la máxima dimensión del gabinete. En este caso, se considera la medida máxima como la diagonal del baffle delantero del gabinete, con lo cual la distancia de medición queda establecida en:

$$d = 93 \text{ cm}$$

Para obtener la respuesta al impulso se excita al sistema con un barrido senoidal logarítmico. Al hacerlo, el micrófono no solo capta la respuesta del altoparlante si no que también capta la energía que entrega la sala excitada por el mismo barrido, con lo cual la respuesta en frecuencia no será la propia del sistema acústico. Con el fin de independizarse de la sala en la cual se realiza la medición, se procede a ventanear la respuesta al impulso de manera que la energía que se tome sea solo la provista por el altoparlante antes de que llegue la primer reflexión, es decir quedándose solo con el sonido directo del altoparlante. El ventaneo propuesto se realiza teniendo en cuenta la distancia de medición (sonido directo) y la distancia de la primer reflexión. En este caso, se considera que la reflexión del piso es la primera en llegar al punto de medición, con lo cual, teniendo la altura de medición (h), la distancia de medición (d) y la velocidad del sonido (c), se puede obtener la diferencia de tiempo que hay entre el sonido directo y la primer reflexión:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \sqrt{h^2 + \frac{d^2}{4}} - d}{c}$$

Por otro lado, cuando se procede a ventanear la respuesta al impulso, debido a las propiedades de la transformada de Fourier, se pierde información en baja frecuencia, de hecho, la mínima frecuencia que se puede analizar bajo esta técnica, es la frecuencia cuyo período es igual al tamaño de la ventana. A menor ventana, mayor es la mínima frecuencia a partir de la cual es válido el análisis. Teniendo esto en cuenta, en este caso, el tamaño de la ventana debe ser lo más próximo posible a la diferencia temporal entre el sonido directo y la primer reflexión. La

frecuencia a partir de la cual tiene relevancia la medición de campo lejano ventaneada se puede expresar como:

$$f_{min_{FF}} = \frac{1}{\text{Tamaño de ventana [s]}}$$

Además, el tamaño de la ventana, y por ende la frecuencia mínima anteriormente planteada, dependen de la frecuencia de muestreo f_{sample} y de la cantidad de muestras M que contiene la ventana. Es decir, el tiempo de la ventana será la cantidad de muestras por el período de muestreo ($M \cdot \frac{1}{f_{sample}}$).

2.3.2. Medición Nearfield

Como la medición en campo lejano es válida a partir de una cierta frecuencia $f_{min_{FF}}$, todo el rango de frecuencias que se encuentre debajo de la misma se perderá, con lo cual para compensar dicha pérdida se realizan mediciones de campo cercano, focalizando el micrófono en las fuentes que radían energía, en este caso, el driver y el port.

La principal ventaja de las mediciones Nearfield es que no se ven contaminadas por la energía que aporte la sala, solo contiene información de cada fuente. No obstante, al estar tan cerca de la fuente, la medición es muy sensible a la posición del micrófono debido a que se pueden estar midiendo modos propios del diafragma del altoparlante, lo cuales modifican la respuesta en altas frecuencias. Lo mismo para el port, que si no se tienen en cuenta los niveles de potencia entregados, podría llegar a distorsionar. Y además, si bien en este caso no sucede por cómo están dispuestas las fuentes, cuando el port se encuentra cerca del driver puede haber contaminación por diafonía, es decir que cuando se mida un elemento, el efecto de radiación del otro va a influir en cierta medida en la respuesta.

Las mediciones de campo cercano deben realizarse a una distancia del 11 % del radio efectivo de la superficie radiante para lograr tener un error de igual o menor a 1 dB. Dichas mediciones van a ser válidas sólo para el rango de frecuencias donde el altoparlante se comporta pistónicamente, es decir, hasta $k \cdot r = 1$, siendo k el número de onda y r el radio efectivo del diafragma, con lo cual, teniendo en cuenta esto, la frecuencia máxima de validez de la medición en campo cercano está dada por:

$$f_{max_{NF}} = \frac{c}{2\pi r}$$

Una vez obtenidas las respuestas al impulso de cada superficie radiante, se procede a sumar ambas respuestas (port + driver) teniendo en cuenta que se deben sumar las respuestas al impulso y no los espectros en frecuencia para poder considerar la fase. Previo a esto, se debe escalar la respuesta del port con la del driver ya que como las mediciones se realizan a una distancia muy pequeña, no se contemplan las dimensiones de las superficies radiantes,

con lo cual se tiende a sobre estimar la respuesta del port. De hecho, no tendría sentido que en muy baja frecuencia, por debajo de la resonancia, el port tenga más energía que el driver dado a que es el driver quien en esta zona carga con energía al port. Como es una relación de superficies radiantes, el escalamiento que se aplica se puede expresar como:

$$E_{scalado} = \frac{D_{Port}}{D_{Driver}}$$

siendo D_{Port} el diámetro efectivo del port y D_{Driver} el diámetro efectivo del driver. Una vez escalada la respuesta, se procede a sumarla con la respuesta del driver para obtener una única respuesta de campo cercano.

Finalmente, se debe aclarar que las mediciones de campo cercano son insensibles a las dimensiones del gabinete, lo cual implica que toda la energía que capta el micrófono es como si el sistema estuviera radiando en media esfera, mientras que en la realidad esto no sucede, el sistema radia energía en 4π , es decir, omnidireccionalmente. Entonces, para obtener una medición que represente a la realidad, se debe aplicar una corrección que depende de las dimensiones del baffle frontal.

2.3.3. Respuesta cuasi-anecoica

Para la obtención de la respuesta en frecuencia en condición cuasi-anecoica, se deben combinar las respuestas obtenidas en campo lejano y cercano. De todos modos, es necesario primero nivelar ambas curvas debido a que como las mediciones se realizan siempre a un mismo nivel de potencia, es lógico pensar que la medición de nearfield estará sobre estimada respecto a la farfield. Con lo cual, la corrección a aplicar se define como:

$$Nivelado_{NF-FF} = \frac{r}{2 \cdot d}$$

siendo r el radio efectivo del diafragma y d la distancia de medición.

Una vez niveladas ambas curvas, para poder empalmarlas, se debe tener en cuenta una zona de solapamiento espectral, en la cual ambas curvas compartan información. Esta zona está delimitada por los límites máximos y mínimos en frecuencia, y se puede expresar como:

$$f_{min_{FF}} < f < f_{max_{NF}}$$

En la Figura 2 se puede observar un diagrama en bloques que resume el procedimiento necesario para la obtención de una respuesta en frecuencia en condición cuasi-anecoica [2][3].

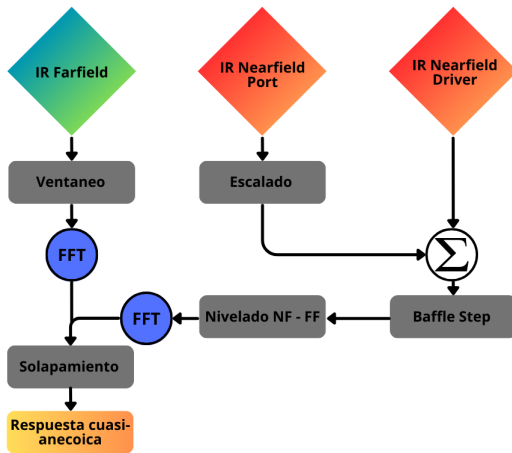


Figura 2: Pasos para obtener una respuesta cuasi-anecoica.

Finalmente, obtenida la respuesta en frecuencia final cuasi-anecoica, se procede a compararla con los resultados obtenidos en Basta!.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Parámetros de Thiele-Small

En primera instancia, en la Figura 3 se presentan las curvas de impedancia del altoparlante al aire libre con y sin masa agregada a partir de las cuales se calculan los parámetros de Thiele-Small.

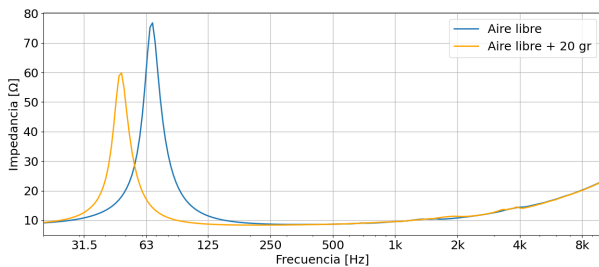


Figura 3: Respuesta de impedancia eléctrica al aire libre con y sin masa agregada.

En el mismo se puede observar que la frecuencia de resonancia del parlante se encuentra en 67.46 Hz. Por otra parte, aproximadamente en 1800 y 3900 Hz se presentan picos en la respuesta, en ambas mediciones. Dichas anomalías se analizan posteriormente si son características propias del altoparlante, o generadas a causa de la medición.

Teniendo en cuenta ambas mediciones, a través del LIMP se calculan los parámetros de Thiele-Small. Los mismos se pueden ver en la Tabla 2. Además, se muestran los datos provistos por el fabricante del altoparlante en su hoja de datos.

Tabla 2: Parámetros Thiele-Small

Parámetro	Medición	Datasheet
f_s	67,44 Hz	72 Hz
R_E	7,3 Ω	5,2 Ω
L_E	0,3 mH	0,6 mH
Bl	9,92 Tm	9,5 Tm
C_{MS}	0,26 $\frac{mm}{N}$	0,28 $\frac{mm}{N}$
M_{MS}	21,25 gr	17 gr
R_{MS}	1,42 $\frac{kg}{s}$	0,67 $\frac{kg}{s}$
Q_{ES}	0,66	0,44
Q_{MS}	6,54	11,5
Q_{TS}	0,6	0,42
S_D	132,73 cm ²	132 cm ²
V_{AS}	6,41 L	7 L

Con respecto a la máxima excursión del cono X_{max} el fabricante declara $X_{max} = 6 mm$ junto con una potencia máxima de 300 W definida por el mismo como el doble de la potencia nominal 150W . Esta última es medida con un test de 2 horas realizado con señal de ruido rosa en el rango de $(f_s - 10f_s)$ y se calcula en base a la impedancia mínima.

En general los valores obtenidos mediante la medición no distan mucho de los valores brindados por el fabricante, quien declara que los parámetros son medidos luego de un test de pre acondicionamiento con onda senoidal de alto nivel a 20 Hz. La diferencia existente en el valor de R_E puede deberse a dos motivos, por un lado, la inclusión de cables coco-coco en el set up de medición, los cuáles agregan una cierta resistencia en serie a la del altoparlante, y por el otro, el error del multímetro utilizado para medir la resistencia nominal del altoparlante puede no ser despreciable en estos casos al estar trabajando con tan baja impedancia. Con respecto al resto de parámetros hay que tener en cuenta que los datos que entrega un fabricante son provistos para un equipo nuevo y en excelente estado, con lo cual, es de esperar que existan diferencias en algunos valores, más que nada en los referentes al control de la resonancia.

3.2. Simulación

Para simular el altoparlante y el gabinete se hace uso del software Basta!, en donde primero se simula el driver solo al aire libre a partir de los parámetros obtenidos en la Tabla 2. Por como está diseñado el software, no hace falta ingresar todos los parámetros obtenidos sino que basta con solo ingresar algunos para que se efectúe la simulación, el resto de valores se determina resolviendo las ecuaciones planteadas por Thiele-Small. Teniendo esto es mente, se puede decir que habrá parámetros más fiables que otros a la hora de simular. Además, los parámetros de la tabla correspondientes a la medición, no son exactamente los del altoparlante mismo sino que son una

estimación del software LIMP, con lo cual, si se eligen parámetros que se puedan determinar desde la respuesta de impedancia y no con cálculo derivados, la simulación será más representativa de la realidad. En este caso, se opta por ingresar f_s , R_E , S_D , Q_{ES} , Q_{TS} y M_{MS} .

En la Figura 4 se puede ver una comparativa entre la curva de altoparlante al aire libre medida y la misma simulada con el Basta!.

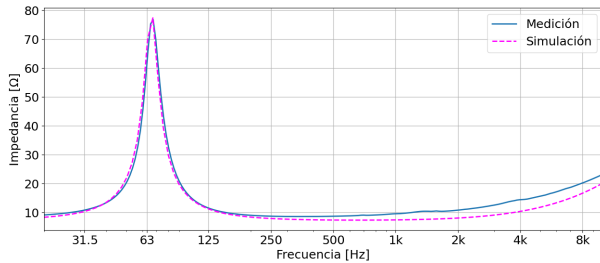


Figura 4: Comparación entre la medición de impedancia y su simulación.

Las diferencias más notable es en impedancias medias y altas, debido a alinealidades que suceden en la medición y no son consideradas en la simulación. Cabe destacar que dicha simulación es válida hasta $k \cdot r = 1$, frecuencia donde el parlante se deja de comportar de forma pistónica. Por lo que, la simulación será válida hasta 839 Hz aproximadamente.

Posteriormente, en la Figura 5 se puede ver la curva de impedancia del mismo altoparlante pero montado en un gabinete sintonizado, para luego analizar una simulación del sistema completo.

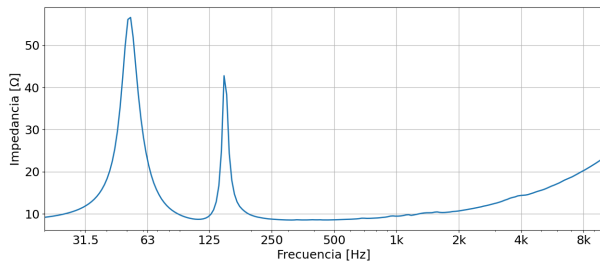


Figura 5: Respuesta de impedancia eléctrica del driver dentro del gabinete.

Con respecto a los picos presentes en alta frecuencia, particularmente en 1800 Hz y 3900 Hz, como siguen presentes en la curva de impedancia, a pesar de haber modificado el sistema, se puede inferir que es una característica propia del cono del altoparlante, como ser algún tipo de resonancia del material con el que está hecho el mismo.

Mediante la Figura 5 se puede deducir que es un gabinete del tipo sintonizado, ya que se observan dos picos

en amplitud y un valle entre ellos, donde el valle coincide en frecuencia con la sintonización del gabinete. Esto ocurre ya que, al resonar el sistema acústico, se produce un mínimo de fuerza contraelectromotriz, lo cual también se puede ver como un mínimo en la velocidad del cono a la frecuencia de sintonía del port. Por otro lado, dada la marcada diferencia en la amplitud de los picos en la curva, se puede inferir que el sistema está sobresintonizado respecto a la frecuencia de resonancia propia del altoparlante. Dicha frecuencia se encuentra en $f_b = 107 \text{ Hz}$.

Para poder simular el gabinete, se tiene en cuenta su volumen $V_b = 5,9 \text{ L}$, el diámetro del port $D_p = 4 \text{ cm}$ y la frecuencia de sintonía f_b . Además, ya que el gabinete no contiene absorbente, todo su volumen compliant se comporta de manera adiabática. Dicha especificación se introduce en la simulación a través del parámetro $V_{iso}[\%]$, el cual indica el porcentaje del volumen que se comporta isotérmicamente.

Para terminar de aproximar la simulación a la medición y tratar de que sea lo más representativa posible, se compara su respuesta en impedancia con la respuesta medida, tanto en gabinete sintonizado como en ventilado. En principio, estimar el Q , tanto del gabinete como del port, es difícil ya que no hay información suficiente. Por lo general el Basta! tiene por defecto un valor de 20 para ambos parámetros (Q_b y Q_p), ya que dicho software no contempla el material, o mejor dicho las pérdidas del material con el cual están fabricados tanto el gabinete como el tubo. En este caso, al tratarse de un gabinete de madera van a existir filtraciones de energía debido a que no posee un aislamiento perfecto, con lo cual se adopta un $Q_b = 10$. Con respecto al port sucede algo parecido, en este caso, no se trata de un tubo ajeno al gabinete que se coloca dentro del mismo sino que está formado directamente por el espesor de la madera de la tapa lateral, con lo cual, se adopta un $Q_p = 15$. Finalmente, para el gabinete cerrado, al tapar el orificio generado por el port, se está sellando aún más el sistema, aumentando el Q del gabinete, con lo cual en este caso se adopta un $Q_b = 20$.

En la Figura 6 y 7 se observa la respuesta en impedancia eléctrica para gabinete sintonizado y gabinete cerrado, o sea, con el port tapado. En éste último, como es de esperarse, se obtiene un solo pico de impedancia, en el cual se encuentra la frecuencia de resonancia f_c del sistema, la cual se encuentra en 104 Hz. Frecuencia superior a la frecuencia de resonancia propia del altoparlante al aire libre, producto del incremento de la rigidez producido al empujar el parlante en el gabinete cerrado.

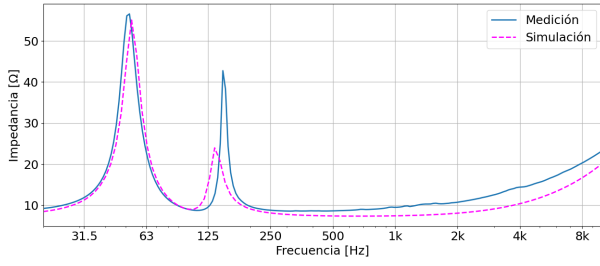


Figura 6: Respuesta de impedancia eléctrica del parlante dentro de un gabinete sintonizado.

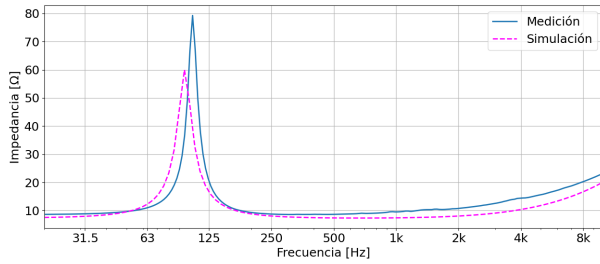


Figura 7: Respuesta de impedancia eléctrica del parlante dentro del gabinete cerrado.

A partir de la curva de impedancia correspondiente al gabinete cerrado se puede calcular el Q_{TC} del sistema que caracteriza al mismo en condición de resonancia. Conociendo la frecuencia del sistema f_c y la frecuencia de resonancia del parlante f_s , se puede estimar el α del sistema y por ende, Q_{TC} .

$$\alpha = \left(\frac{f_c}{f_s}\right)^2 - 1 \rightarrow \alpha = 1,08$$

$$Q_{TC} = Q_{TS} \cdot \sqrt{1 + \alpha} \rightarrow Q_{TC} = 0,87$$

En este caso, el Q resultante puede dar indicios de que en la respuesta en frecuencia, la curva presentará un refuerzo en la zona de resonancia.

En el caso del gabinete sintonizado, la f_b se encuentra en valores relativamente altos con lo cual es de esperar que en cercanías de 110 Hz, la respuesta del sistema presente un sobrepico respecto a los casos del parlante al aire libre y en un gabinete cerrado.

En la Figura 8 se puede ver una comparación entre la respuesta del altoparlante al aire libre, la respuesta del altoparlante en un gabinete cerrado y ventilado. Cabe aclarar que en este caso no se tuvo en cuenta la difracción producida por el baffle step.

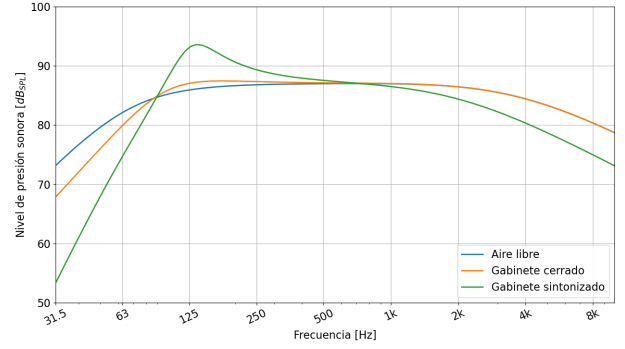


Figura 8: Respuesta simulaciones: Aire libre, gabinete cerrado, gabinete sintonizado.

Finalmente, en la Figura 9 se presenta la simulación completa del sistema real (gabinete sintonizado). En la misma se pueden observar las curvas de impedancia eléctrica (marrón), sensibilidad (naranja), velocidad del port (amarillo), excursión del cono (rojo) y respuesta del sistema en máximo nivel de salida (gris). En dicha simulación, se tiene en cuenta el baffle step, la cual se aplica directamente desde el Basta! introduciendo las medidas del baffle frontal.

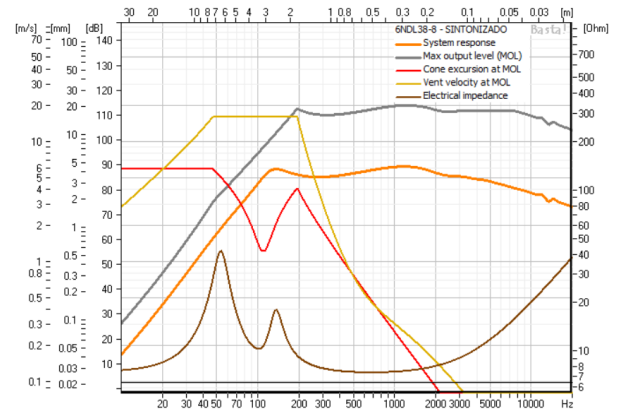


Figura 9: Simulación del sistema.

Al igual que la simulación de impedancia eléctrica, esta es válida hasta $k \cdot r = 1 \rightarrow 839 \text{ Hz}$. En la misma se observan recortes producidos en la excursión del altoparlante y en la velocidad del port. En la realidad, el recorte más representativo se puede decir que es el de la velocidad del resonador, ya que debido a su pequeña superficie es muy probable, que incluso sin llegar a los máximos niveles, se genera turbulencia. La velocidad máxima del port se establece en $16 \frac{m}{s}$. Por otro lado, el recorte presente en bajas frecuencias para la excursión del cono no tiene tanto peso en el análisis debido a que el altoparlante comienza a funcionar a partir de 70 Hz.

3.3. Respuesta en frecuencia

Todas las mediciones acústicas son realizadas y procesadas con ARTA, con posterior análisis de gráficos en Python. La frecuencia de muestreo a la que se realizaron las mediciones fue $f_{sampleo} = 48 \text{ kHz}$. El tamaño de la ventana utilizado fue de 16k, con un ventaneo uniforme. No hay a disposición una señal de referencia para calibrar correctamente los tiempos de inicio de cada respuesta al impulso en función del tiempo de vuelo. A su vez, las respuestas en frecuencias poseen un suavizado de 1/24 de octava para filtrar posibles ruidos y ver con claridad la envolvente de las respuestas.

3.3.1. Medición Farfield

Para la medición farfield se comienza procesando la respuesta al impulso para obtener la respuesta en frecuencia de campo lejano. Como se menciona previamente, se ventanea dicha respuesta al impulso para así aislar la medición de las reflexiones y respuesta propia de la sala. Asumiendo que la primera reflexión es la del piso, el tiempo $\Delta t_{S,D-1^{er}R}$ que hay entre sonido directo y la primera reflexión es:

$$\Delta t_{S,D-1^{er}R} = 3,825 \text{ ms}$$

Por lo tanto, la ventana para aislar la primera reflexión debe ser de igual o menor duración que 3.825 ms. Al tener la señal muestreada a un determinado período, no es posible igualar dicho tiempo, pero sí obtener un tiempo muy cercano de 3.688 ms, lo que equivale a tomar 177 muestras de la respuesta al impulso. Dicho proceso de ventaneo se observa en la Figura 10.

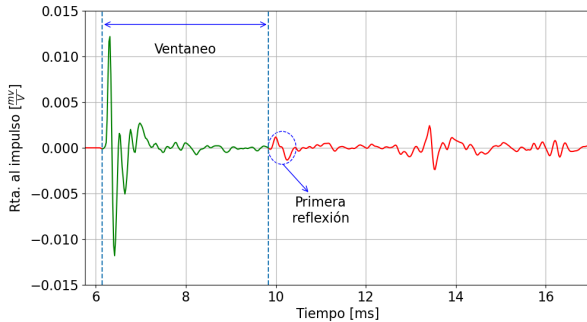


Figura 10: Ventaneo de la respuesta al impulso.

Al ventanear, se pierde información en bajas frecuencias, por lo tanto, la medición ventaneada es válida hasta:

$$f_{min_{FF}} = 271 \text{ Hz}$$

En la Figura 11 se muestra la respuesta en frecuencia de la medición farfield con y sin ventaneo. Las respuestas de ambas curvas son muy similares en alta frecuencias, mientras que a medida que la curva ventaneada se

acercas a su frecuencia mínima admisible, la información comienza a perder precisión.

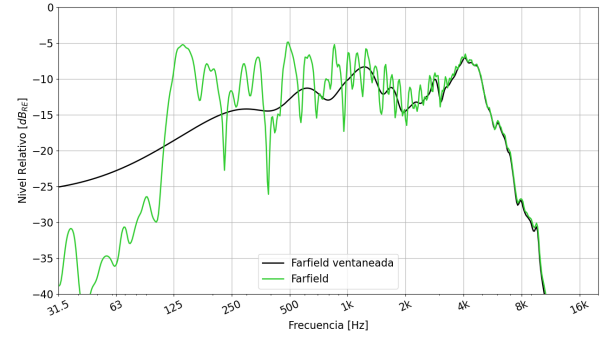


Figura 11: Medición farfield con y sin ventaneo.

3.3.2. Medición Nearfield

En las mediciones nearfield, se analizan las respuestas al impulso del parlante y la respuesta al impulso del port. La respuesta de cada una aparecen en la Figura 12.

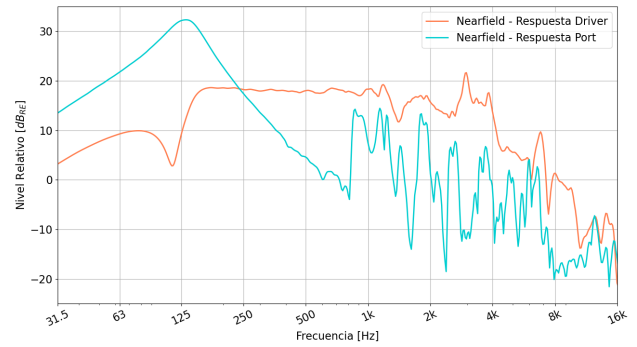


Figura 12: Respuesta en frecuencia nearfield del driver y port.

Se puede observar la sobre estimación de la respuesta del port por sobre la respuesta del driver, por lo tanto, se debe aplicar el factor de escala que compara las superficies radiantes.

$$Escala = \frac{4 \text{ cm}}{13 \text{ cm}} = 0,31 = -10,17 \text{ dB}$$

Además, la respuesta en frecuencia del port muestra su máximo nivel a un valor de frecuencia distinto que el de su sintonización, lo cual se puede observar no solo en la medición sino también en la simulación del sistema. Esto puede llegar a ser provocado debido a que la respuesta del resonador es en definitiva dependiente del volumen del gabinete y del Q_{TS} del altoparlante, en este caso, el volumen utilizado es chico y el Q_{TS} relativamente grande, con lo cual, la alta rigidez que presenta el gabinete sumado al poco control en la zona de resonancia

por parte del altoparlante, pueden generar que el pico del port no se encuentre concretamente en la frecuencia de sintonía del sistema como sería de esperar.

Una vez realizada la compensación, se suman ambas respuestas al impulso para obtener una única respuesta de campo cercano. La Figura 13 refleja estos resultados, específicamente, la suma de la respuesta del driver y port.

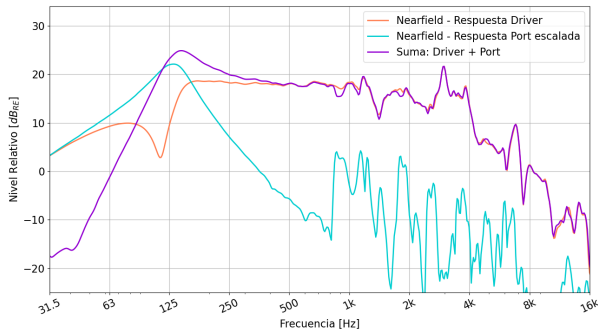


Figura 13: Respuesta de la suma del port y driver.

Al haber sumado las respuestas al impulso, se tiene en cuenta la fase de cada una de ellas, por lo que tiene sentido que la pendiente en baja frecuencia del sistema completo sea mayor que la pendiente de la respuesta del driver, ya que por la rotación de fase que produce el port en conjunto con la pendiente natural del parlante, se generan una pendiente de 24 dB/oct.

Por último, se aplica la corrección de Baffle step a la suma de las respuestas, por lo tanto, la medición nearfield queda caracterizada según la Figura 14.

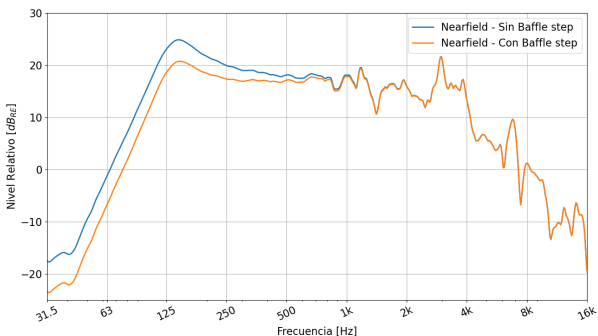


Figura 14: Respuesta nearfield considerando campo cercano.

El análisis de la respuesta en campo cercano es válido hasta $k \cdot r = 1$, en este caso:

$$f_{max_{NF}} = 839 Hz$$

3.3.3. Respuesta cuasi-anecoica

Para obtener la respuesta final cuasi-anecoica, se combina la respuesta nearfield con la farfield. Ambas res-

puestas con sus respectivos límites de validación se muestran en la Figura 15.

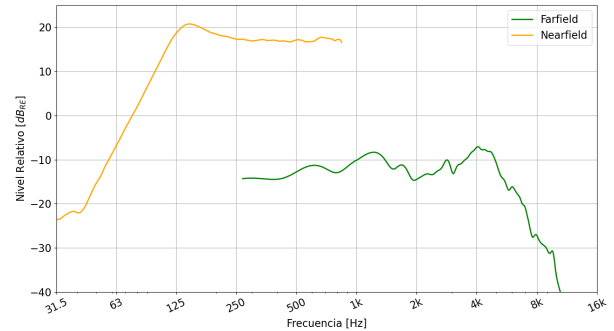


Figura 15: Respuestas nearfield y farfield sin ventanear.

Para juntar ambas respuestas, se escala la curva de nearfield hacia la farfield por medio del factor que compensa los niveles en función de la distancia y el radio efectivo del diafragma.

$$Nivelado_{NF-FF} = \frac{6,5 \text{ cm}}{2 \cdot 93 \text{ cm}} = 0,035 = -29 \text{ dB}$$

Dicho escalamiento acerca lo suficiente ambas curvas para poder realizar el solapamiento. No obstante, las curvas no terminan de empalmar del todo, con lo cual, se decide aplicar una corrección de +0,5 dB a la curva del nearfield para terminar de juntar las curvas en una zona conveniente para el solapamiento. Dicha corrección, al ser menor a 1 dB, se encuentra dentro del error de medición planteado por Dr Keele en su método, con lo cual la respuesta va a seguir siendo representativa.

Con esto, se logra la respuesta que se ve en la Figura 16.

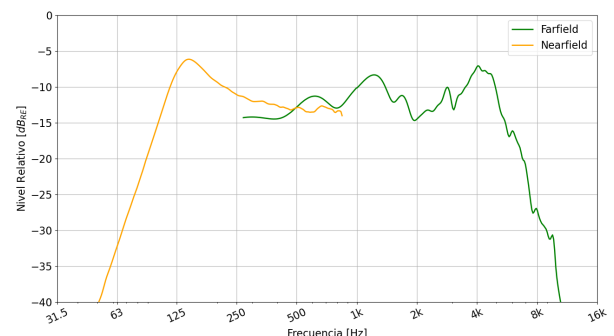


Figura 16: Solapamiento entre respuestas de nearfield y farfield.

Finalmente, la respuesta en frecuencia final en condición cuasi-anecoica se observa en la Figura 17.

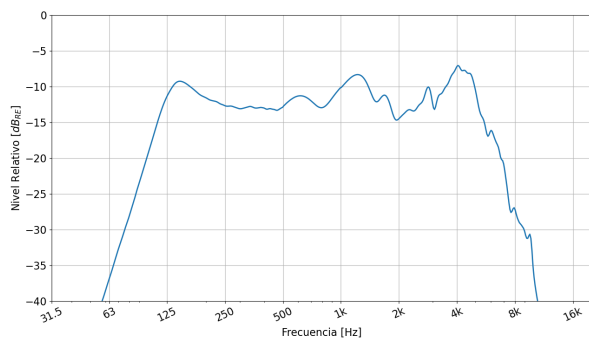


Figura 17: Respuesta en frecuencia cuasi-anecoica del sistema.

A partir de esta última respuesta en frecuencia se puede hacer algunas observaciones. En primer lugar, para bajas frecuencias se observa una pendiente de $24 \frac{dB}{Oct}$ típica en un sistema de gabinete ventilado. Por otro lado, al redor de 140 Hz se puede ver una marcada resonancia producto de la sobresintonización del sistema ventilado junto a un Q_{TS} un poco por encima de lo considerado “ideal” ($Q_{TS_{ideal}} = 0,4$) para un sistema de este tipo. Llegando a medias frecuencias se encuentran algunas particularidades previamente analizadas en la respuesta de impedancia, como los picos presentes alrededor de 1800 Hz y 3900 Hz . Si bien esos picos fueron considerados propios del diafragma del altoparlante, el gabinete también puede estar afectando la respuesta.

3.3.4. Comparación medición y simulación

Para terminar de analizar el sistema por completo se realiza una comparación de la respuesta final obtenida por medio de la simulación y la medición en condición cuasi-anecoica con todas las consideraciones previamente establecidas. En la figura 18 se pueden observar ambas curvas de respuesta en frecuencia. En baja frecuencia las pendientes de $24 \frac{dB}{Oct}$ esperada se respeta solo para el caso de la respuesta medida, mientras que para la simulación dicha pendiente es un poco menor, en concreto de $20 \frac{dB}{Oct}$. Por otro lado, en la curva correspondiente a la medición, el pico de resonancia está ligeramente corrido hacia la derecha. Desde la frecuencia de resonancia hasta aproximadamente 1 KHz , se puede ver claramente el efecto de la difracción de borde causada por las dimensiones del baffle frontal. No obstante, si bien las curvas siguen una forma “similar” en medias frecuencias, las mismas comienzan a separarse una de la otra a partir de 500 Hz hasta llegar a altas frecuencias en donde ni siquiera coinciden en la pendiente de caída. Esto puede deberse principalmente por dos motivos. El primero tiene que ver con que si bien en el trabajo se hizo la aclaración de que la simulación es válida hasta $k \cdot r = 1 \rightarrow 839 \text{ Hz}$, en la realidad, la simulación puede dejar de ser representativa en frecuencias menores, donde $k \cdot r = 0,5 \rightarrow 419,5 \text{ Hz}$. Y el segundo punto por el cual las curvas comienzan a separarse hasta

llegar al punto de ser completamente distintas se debe a posibles alinealidades propias del altoparlante que no están consideradas en el software de simulación. Además, el mismo tampoco contempla las pérdidas reales del gabinete.

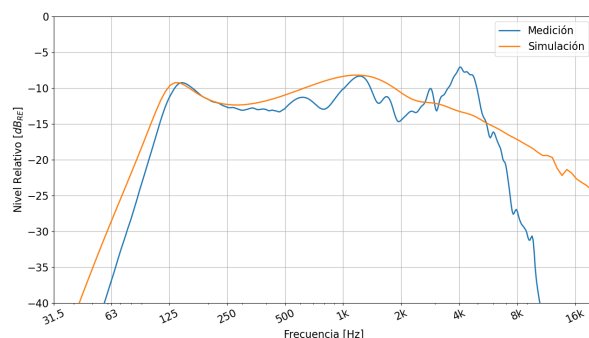


Figura 18: Comparación respuesta en frecuencia del sistema medido y simulado.

4. CONCLUSIONES

Una vez hecho todo el estudio y análisis y teniendo en cuenta que el altoparlante utilizado es un parlante de “medios”, el cual va a tener un funcionamiento útil entre $70 \text{ Hz} - 6 \text{ KHz}$ (datos entregados por el fabricante), se puede concluir que el sistema responde adecuadamente. Ahora bien, teniendo en cuenta que el altoparlante cuenta con un Q_{TS} mayor a $0,45$, sintonizar tan por encima de la f_s quizá no sea la mejor idea de diseño. Si bien el volumen pequeño del gabinete hace que la respuesta no quede demasiado resonante, una mejor opción podría ser la de sintonizar más cercano a f_s , cambiando un poco las dimensiones del port, lo que generaría no solo que haya un mejor control en la resonancia sino que también extendería un poco el rango de la respuesta del sistema (más allá de una pequeña pérdida de sensibilidad), lo cual es positivo teniendo en cuenta que se trata de un sistema de una única vía en donde se busca reproducir el mayor rango de frecuencias posible. A su vez, algo importante a destacar es que seguramente se produzcan turbulencias en el port a medida que se suba el nivel debido a que su superficie es demasiado pequeña. No obstante, se torna difícil encontrar el balance entre bajar la sintonía del sistema y agrandar lo suficiente el diámetro del port para evitar dicho fenómeno debido al pequeño volumen de gabinete con el que se cuenta.

Con respecto a las simulaciones de las mediciones tanto acústicas como eléctricas, se puede concluir que son una herramienta de gran ayuda a la hora de estudiar el comportamiento de un sistema en condiciones de bajo nivel y baja frecuencia, más que nada para cuando no se cuentan con los medios necesarios para poder realizar una medición real o bien para un posible análisis pre-diseño del sistema e incluso estudiar como repercuten diferen-

tes modificaciones al sistema medido. Si bien cuenta con sus limitaciones, dan una idea bastante cercana a la realidad. A su vez, el método de medición en condición cuasi-anecoica también mostró ser de gran utilidad cuando no se cuenta con un entorno “ideal” para realizar las mediciones acústicas, como ser una cámara anecoica.

REFERENCIAS

[1] *B&C Speakers: 6NDL38*. Disponible en línea: <https://www.bcspeakers.com/es/products/lf-driver/6-5/8/6ndl38-8/>

[2] *Apunte Electroacústica 2*.

[3] Keele, D. B. - *Low-Frequency Loudspeaker Assessment by Nearfield Sound-Pressure Measurement*.