

ANÁLISIS DIRECTIVO DE UNA BOCINA

Almaraz, Juan¹
Rucci, Juan²

Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero

¹juan.almaraz097@gmail.com

²ju4n113@gmail.com

Resumen – *En este informe se realiza un análisis sobre la directividad de un sistema formado por un driver de compresión y una bocina. Para ello, se realizaron mediciones ventaneadas de respuesta al impulso a distintos ángulos de incidencia. También se analizó la respuesta en frecuencia referida a niveles SPL. Para observar los resultados de las mediciones, se representaron las mediciones en gráficos de contour y polar, generados a partir de un script en python. Se analiza el comportamiento del sistema tanto en sentido horizontal como vertical. Finalmente se midió el nivel equivalente de ruido de fondo por tercios de octava para validar las mediciones y asegurarse de tener una relación señal a ruido suficiente.*

1. INTRODUCCIÓN

El sistema electroacústico a medir está formado por el driver de compresión DE400TN [1] de la marca B&C, y la bocina ME20 [2] de la misma marca. Esta bocina tiene una garganta de una pulgada de diámetro, la cual coincide con la superficie de salida del driver. Esto es necesario ya que si hubiera diferencias entre las superficies de los elementos se produce un cambio de impedancia que impide transferir la totalidad del campo hacia la bocina.

En la figura 1 se puede ver la bocina utilizada.



Figura 1. Bocina ME20 de la marca B&C. Izquierda: vista frontal y lateral. Centro: vista superior y posterior. Derecha: Vista frontal.

Mediante la hoja de datos se obtienen sus parámetros. La garganta tiene un diámetro de 25 mm, mientras que la boca es cuadrada de dimensiones de 145x145 mm, con un largo de 90 mm. La frecuencia de corte inferior de la bocina es de 1.5 kHz. Según el fabricante la bocina es del tipo exponencial, aunque presenta ensanchamientos diferentes en vertical y en horizontal, se debe tener consideración sobre esta información, ya que puede ser una simplificación del fabricante para la comercialización de la misma. Lo mismo ocurre con la información de cobertura nominal de la bocina, los cuales son 90° en sentido horizontal, y 60° en sentido vertical. Estos valores no son constantes en el rango de uso, por lo tanto el

fabricante debe tomar una decisión sobre el valor que mejor representa al sistema.

Luego, el driver de compresión utilizado se muestra en la figura 2.



Figura 2. Driver de compresión de la marca B&C. Izquierda: vista posterior. Derecha: Vista frontal.

Su sensibilidad según el fabricante es de 106 dB, con un ancho de banda de 1200 Hz a 18000 Hz, y una potencia nominal de 50 W. La impedancia nominal es de 8 Ω y el diámetro de la garganta es de 25 mm.

Para rotar al sistema y realizar las mediciones a distintos ángulos, se utilizó la mesa rotativa Outline ET250. Esta se conectó a una laptop y se controló con el software ARTA para realizar automáticamente la rotación del sistema y la medición al ángulo correspondiente. Como micrófono de medición se utilizó el Earthworks M50, el cual se conectó a una interface RME UCX. Para alimentar al driver se utilizó el amplificador de potencia Powersoft M50Q. Al estar midiendo un driver de compresión, es necesario colocar un filtro pasa-altos para evitar que el diafragma sufra daños. Para ello se filtró la señal de salida directamente desde la interfaz.

Para calibrar el nivel de las mediciones, se utilizó el calibrador de SVANTEK, el cual emite un tono de 1 kHz a 1 Pa (94 dB SPL). Con una medición de esta

señal se puede llevar el resto de las mediciones realizadas a dB SPL. Esto aplica para las mediciones de respuesta en frecuencia y para la medición de ruido de fondo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Directividad del sistema

El objetivo de estas mediciones es representar cómo se distribuye la energía radiada por el sistema en el espacio. Una idea para hacerlo es medir la respuesta en frecuencia del sistema a una cierta distancia, a distintos ángulos de incidencia, de manera de cubrir una esfera completa alrededor del sistema. Como este procedimiento implicaría una gran cantidad de mediciones, se mide la respuesta del sistema sobre los ejes vertical y horizontal. Si bien esta medición no representa al sistema en ángulos de incidencia fuera de los ejes mencionados, se podría interpolar la respuesta y obtener una buena aproximación de su comportamiento.

Para ello, se realizaron mediciones de respuesta al impulso (IRs) del sistema siguiendo el siguiente procedimiento: primero, se colocó el micrófono de medición a 1 m sobre el eje (ángulo de 0°), luego se utilizó la mesa rotativa para rotar a la fuente en pasos de 5°, midiendo de 0° a 180° en el plano horizontal. En la figura 3 se puede ver el esquema implementado.

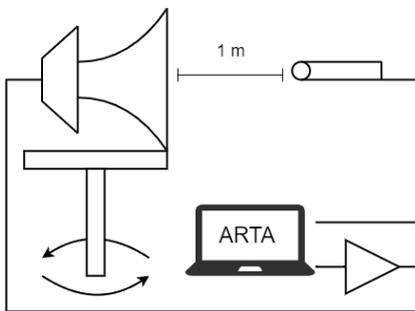


Figura 3. Sistema utilizado para la medición.

Luego, se rota 90° al sistema, de manera que al girar la mesa ahora se mide la respuesta del sistema sobre el eje vertical. En este caso se considera que tanto la respuesta horizontal como la vertical pueden ser espejadas para ángulos negativos. Esto es por la simetría propia del sistema. Si se tuviera un sistema con más de una vía dentro de un gabinete, probablemente no se cumpla con la simetría (por lo menos en el eje vertical), entonces se debería medir de 0° a 360°.

Luego, cada medición se registró con el software ARTA en formato *pir*, y se exportó en formato *txt* para después ser procesada en un código en python. Se ventanearon las mediciones para excluir la primera reflexión y se calculó la *fft* de cada medición para obtener la respuesta en frecuencia a cada ángulo. Finalmente se procede a representar gráficamente la

direccionalidad del sistema a partir del generado de gráficos tipo contour y polar. En esta sección interesa estudiar principalmente la directividad del sistema y no tanto su respuesta en frecuencia. Por lo tanto cada espectro se normalizó con la respuesta a 0°, de manera que los gráficos únicamente representan la directividad del sistema.

Se midieron 37 respuestas al impulso por cada eje, resultando en un total de 73 mediciones. Cada punto de medición se representa en la figura 4a, y con el software ARTA se espejaron las mediciones para obtener la circunferencia completa, como se muestra en la figura 4b.

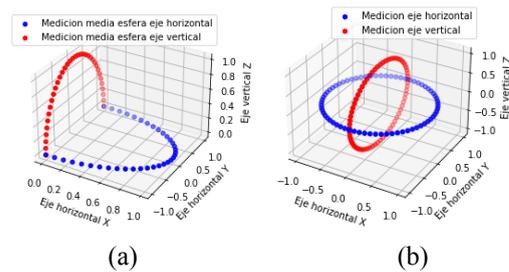


Figura 4. Mediciones de respuesta al impulso en los ejes vertical y horizontal.

2.2. Respuesta en frecuencia

Para este apartado, se tomaron las mediciones de respuesta al impulso a 0°, 15°, 30° y 45° obtenidas anteriormente en formato *txt*. Con la señal de calibración de 1 kHz a 94 dB SPL, se tomó el valor RMS de la misma y se calibraron las mediciones de la siguiente manera.

$$x_n [Pa] = \frac{x_n [eV] * 1 [Pa]}{x_{cal_RMS} [eV]} \quad (1)$$

Luego, mediante el cálculo de la *fft*, se obtiene el espectro en dominio frecuencial, el cual se puede expresar en dB SPL si se refiere el espectro a la presión de referencia (20 μPa). En la figura 5 se puede ver un diagrama de bloques del procesamiento realizado en python de las mediciones obtenidas.

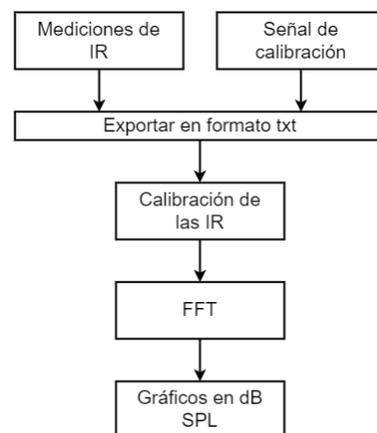


Figura 5. Diagrama de bloque del script en python.

2.3. Ruido de fondo

En este apartado se desarrolla el procedimiento para la obtención del nivel equivalente de ruido presente durante las mediciones. Para ello, se utiliza el calibrador SVANTEK que emite un tono de 1 kHz a 94 dB SPL. Se coloca el calibrador en el micrófono de medición y se registra la señal. Luego se procede a registrar el ruido de fondo de la sala. La duración de la medición del ruido debe ser representativa del ruido real durante las mediciones.

Una vez obtenidos los dos archivos en formato wav, se procede a normalizar la medición de ruido de fondo. Para ello, se debe calcular el valor RMS de la señal de calibración.

Luego se procede a diseñar los filtros de tercio de octava según la norma IEC 61260. Se aplican los filtros al ruido ya calibrado y se calcula el valor rms.

Finalmente se obtiene el nivel de ruido equivalente de la siguiente manera:

$$L_{eq}(f)[dB] = 20 \log\left(\frac{N_{RMS}(f)}{20\mu Pa}\right) \quad (2)$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Primero se realizó una medición de impedancia del driver con el software Limp [3], la cual se puede visualizar en la figura 6.

Se observa una impedancia mínima de 7.3 Ω y una frecuencia de resonancia de 770 Hz.

A diferencia de un altoparlante, la curva de impedancia no presenta información significativa para el estudio del sistema. Se puede saber que el driver tiene una impedancia nominal de 8 Ω a partir de la Z_{min} . Por otro lado se debe evitar utilizar el driver en la frecuencia de resonancia, ya que se puede dañar el diafragma por excursión.

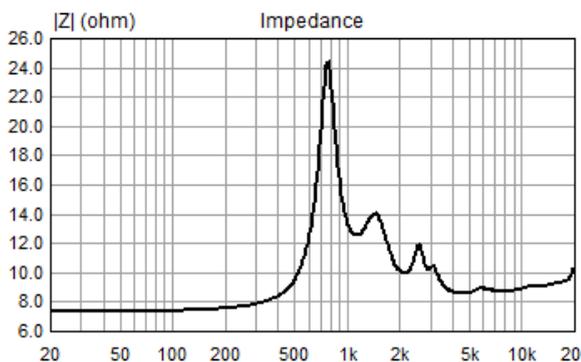


Figura 6. Respuesta al impulso del sistema a 0°.

3.1. Directividad del sistema

A partir de la metodología descrita en la sección 2.1, se realizaron las mediciones de respuesta al impulso del sistema. Las IRs obtenidas se exportaron en formato txt y se guardaron en la carpeta 'mediciones'. Luego, se leen las IRs y se guardan en

un array ordenadas de 0° a 180°. En la figura 7 se puede ver la respuesta al impulso del sistema a 0°.

Se analizaron todas las respuestas medidas para decidir la ubicación y el largo de la ventana.

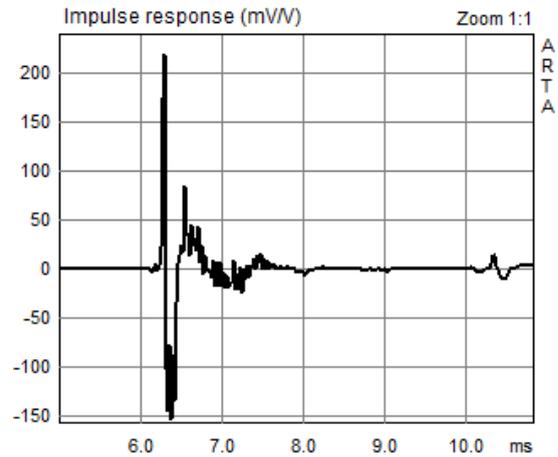


Figura 7. Respuesta al impulso del sistema a 0°.

Se puede ver en la figura 7 que la primera reflexión aparece luego de 4 ms. Cuando se completa la rotación de 180°, la primera reflexión llega 1 ms antes, como se ve en la figura 8. Esto se debe a que cuando la boca de la bocina se encuentra a 180° del punto de medición, el sonido directo debe realizar un recorrido más largo, pero la onda reflejada realiza un recorrido similar.

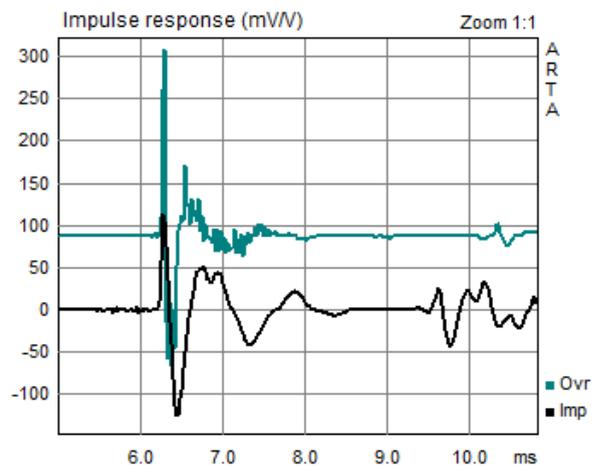


Figura 8. Respuesta al impulso del sistema a 0° (verde) y a 180° (negro).

Entonces, se decide el tiempo de inicio y de final de la ventana desde 5 ms hasta 9 ms (muestra 240 hasta 432). Al tener una fs de 48 kHz y un tamaño de ventana de 192 muestras, se obtiene una resolución espectral de 111 Hz.

Una vez obtenidas las IRs ventaneadas, se procede a calcular la *fft* de cada una con un tamaño de ventana de 1024 muestras. Entonces, se obtienen así 37 espectros, que al espejarlos resultan en 73 espectros que cubren la respuesta en frecuencia del

sistema de -180° a 180° con pasos de 5° . Si estos espectros se ordenan en sentido vertical y con un código de colores que va de rojo a azul indicando la amplitud relativa, se obtienen los gráficos de contorno de la figura 9. Cabe aclarar que cada espectro está normalizado con la respuesta a 0° , como se mencionó anteriormente.

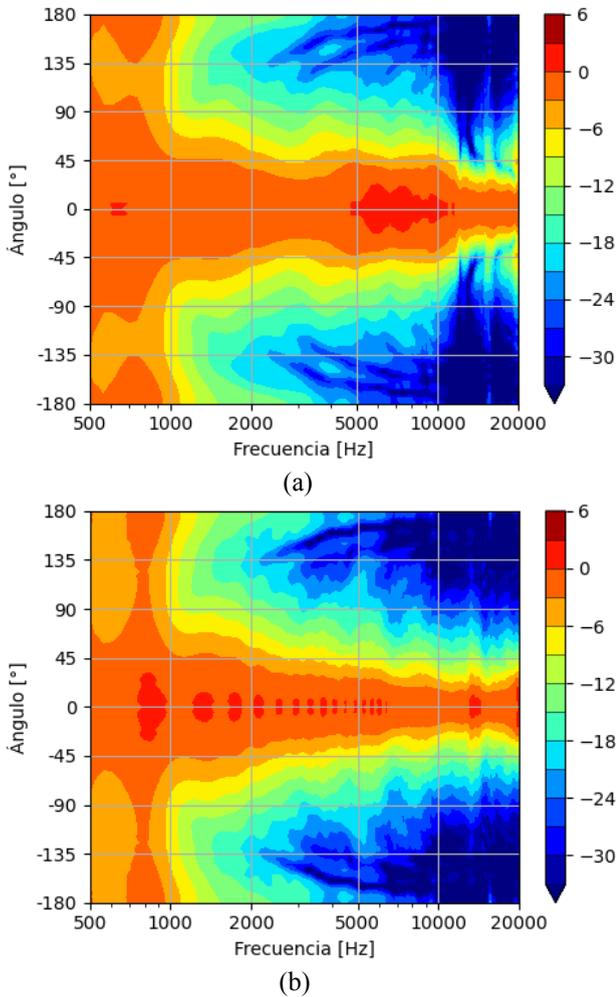


Figura 9. Gráfico de contorno de la respuesta del sistema en sentido horizontal (a) y vertical (b).

Para estudiar la directividad del sistema a partir del gráfico de contorno, es de principal interés observar la curva de -6 dB. Esto es porque el ángulo de cobertura del sistema se define entre los puntos donde la respuesta cae 6 dB con respecto a la respuesta en 0° . En el caso de la figura 9, esta se encuentra en la frontera entre el color naranja y el amarillo.

Analizando los dos gráficos de contorno de la figura 9, se puede ver que por debajo de 1 kHz la respuesta es similar para todos los ángulos de medición. Esto se debe a que la longitud de onda es mayor a las dimensiones de la bocina. De acuerdo al fabricante, las medidas de la bocina son 145 mm x 145 mm x 90 mm. Si se toma la diagonal de 230 mm, esta longitud de onda corresponde a una frecuencia

de 1.5 kHz, lo cual verifica el comportamiento observado.

En la figura 9a, correspondiente a la respuesta horizontal, por encima de 12 kHz se observa que el sistema se vuelve abruptamente más directivo. Esto sucede ya que el propio driver es tan directivo que el frente de onda que irradia no llega a interactuar con las paredes de la bocina. Algunos fabricantes suelen hacer la bocina más angosta al comienzo para generar una difracción que aumente el ángulo de cobertura. Al no utilizar este recurso, por encima de 12 kHz el sistema se comporta como si la bocina no estuviera. Además de comportarse de manera más directiva, se puede ver que el sistema presenta irregularidades en su respuesta. Esto se debe a que, en este rango de frecuencias, el driver junto con su corrector de fase no logra generar una superficie isofásica en la garganta.

Luego, en la banda de paso se puede ver que el ángulo de cobertura es de 90° aproximadamente, con algunas variaciones que se producen producto de la forma de la sección horizontal de la bocina.

Al observar la figura 9b, correspondiente al eje vertical, se puede ver en principio que el ángulo de cobertura es menor. Por debajo de 2 kHz se comporta de manera similar al eje horizontal, pero por encima de esa frecuencia el sistema aumenta constantemente su directividad conforme aumenta la frecuencia. Para decidir el ángulo de cobertura se traza una línea horizontal que mejor coincida con la curva de -6 dB. Se puede decir que se encuentra entre 60° y 70° .

Se puede observar que la directividad del sistema es mayor en el eje vertical en comparación con el eje horizontal. Esta característica es comúnmente observada en la mayoría de las bocinas, ya que suele ser necesario proporcionar una cobertura angular más amplia en el eje horizontal en comparación con el eje vertical. Esto se debe a que, en la mayoría de los casos, la disposición de las personas es horizontal, como ocurre en auditorios o recitales, y la diferencia de altura entre los oyentes es generalmente menor. Incluso si se tratara de una bocina para un sistema de estudio, una mayor cobertura en el plano horizontal es deseable para obtener mayores reflexiones laterales, y no tanto reflexiones que provengan del techo.

Para continuar con el análisis directivo del sistema, a continuación se presentan los gráficos de respuesta polar del sistema en el eje horizontal y vertical.

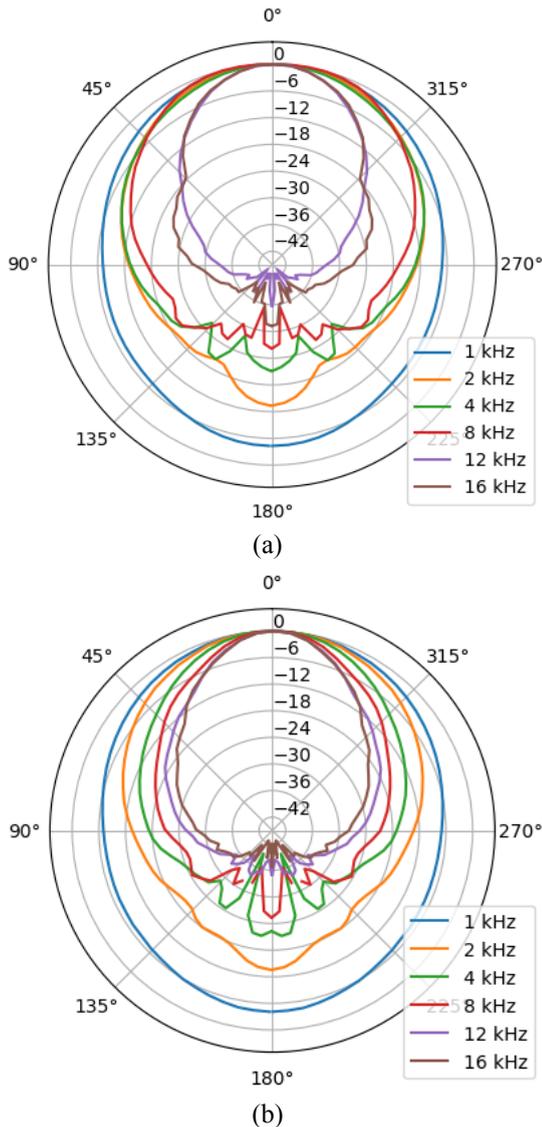


Figura 10. Patrón polar en el eje horizontal (a) y vertical (b).

Observando la figura 10a, se puede ver los cambios abruptos en la directividad de las curvas de 12 y 16 kHz. Este comportamiento es el mismo que se observó en el gráfico de contorno. La irregularidad de la respuesta polar en 16 kHz se explica a partir del gráfico de contorno (fig. 9a), donde no hay una disminución de nivel regular a medida que la respuesta se aleja del eje. Esto se manifiesta en la aparición de lóbulos en el gráfico polar.

Observando el eje vertical (fig. 10b), se puede apreciar que la directividad aumenta a medida que aumenta la frecuencia. Esto se contrasta con el eje horizontal (fig. 10a), donde la bocina logra mantener un ángulo de cobertura de 90° hasta la curva de 8 kHz.

3.2. Respuesta en frecuencia

Mediante la implementación del código en Python, se generan las representaciones gráficas que muestran el nivel de presión sonora respecto a la frecuencia para los ángulos de 0°, 15°, 30° y 45°, tanto para el eje horizontal en la figura 11, y el eje vertical en la figura 12.

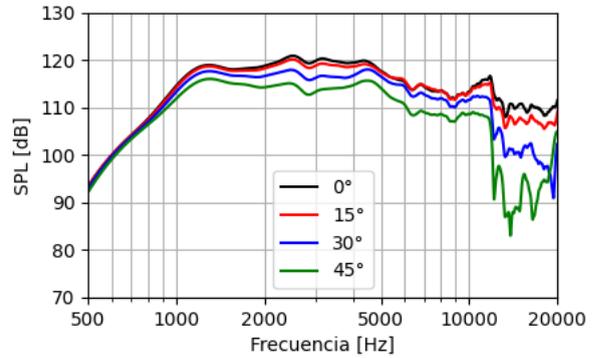


Figura 11. Respuesta en sentido horizontal.

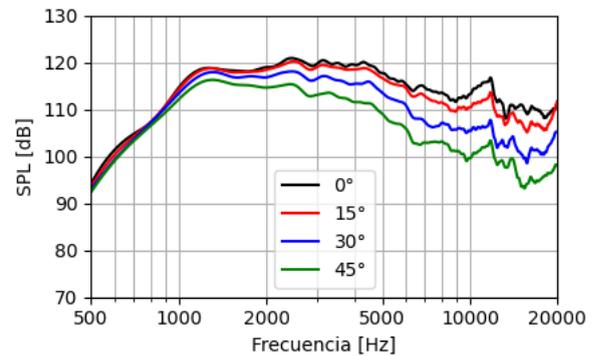


Figura 12. Respuesta en sentido vertical.

Se puede ver que la respuesta en el eje está por debajo de los 120 dB SPL. Teniendo en cuenta que la sensibilidad del driver es de 106 dB @ (1W, 1m), se puede asumir que durante la medición se utilizaron aproximadamente 4 W de potencia. Esta información se debería haber obtenido durante la medición, y se podría haber excitado al driver con 1 W para obtener la sensibilidad del mismo y compararla con los datos del fabricante.

Por debajo de 1 kHz todas las curvas tanto en sentido horizontal como vertical presentan una forma similar. Esto se debe a que la bocina no llega a contener las longitudes de onda correspondientes a ese rango de frecuencias.

En la respuesta horizontal, se puede ver que cerca de 4.5 kHz todas las curvas aumentan su nivel, por lo tanto en esta frecuencia se incrementa el ángulo de cobertura. Este efecto se ve también en el gráfico de contorno.

En el eje horizontal se observa una respuesta casi idéntica en el eje de 15° con respecto a 0°. En cambio, en el eje vertical la curva de 15° se encuentra

a un menor nivel, lo cual se condice con el análisis de directividad realizado en la sección anterior. En ambas respuestas se ve que hay un pico en 12 kHz. Este puede deberse a una resonancia, para ello se utilizó la herramienta cumulative spectral decay del software ARTA, y el resultado se muestra en la figura 13.

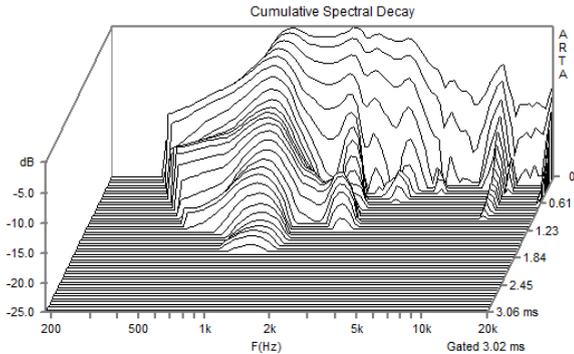


Figura 13. Decaimiento espectral para la respuesta de 0° sobre el eje horizontal.

El decaimiento en esta frecuencia tiene uno de los decaimientos más prolongados en el tiempo y está focalizado en un pequeño rango de frecuencias. A partir de lo observado en el gráfico, y al ser una frecuencia superior a los 10 kHz, se puede deducir que se debe a una resonancia por los modos propios del diafragma.

3.3. Nivel de ruido

Para obtener el nivel equivalente de ruido por bandas de tercio de octava se siguió el procedimiento de la sección 2.3.

En cuanto a los filtros de tercio de octava, se utilizó la librería *scipy* para diseñarlos de acuerdo a la norma IEC 61260. En la figura 14 se puede ver el filtro utilizado para 1 kHz junto con los límites aceptados en la respuesta del filtro.

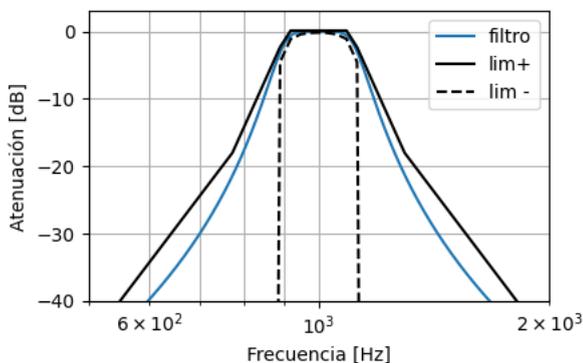


Figura 14. Filtro butterworth de 3er orden.

Los filtros son butterworth de 3er orden, los cuales están centrados en las frecuencias centrales de cada banda de tercio de octava, resultando en un total de 29 bandas.

Luego, se filtró la señal del ruido de fondo y se calculó el nivel equivalente de ruido para cada banda, el cual se expresa en la figura 15.

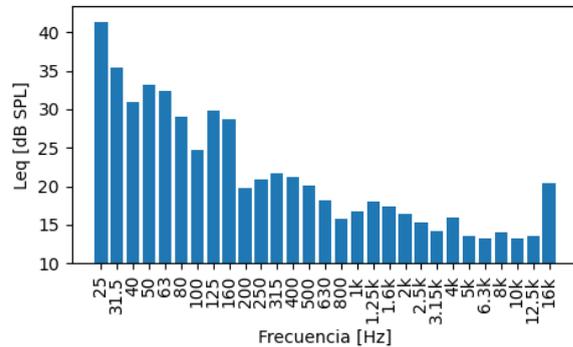


Figura 15. Nivel de ruido equivalente por tercio de octava

Si bien el máximo nivel de ruido es de 40 dB SPL, este se encuentra en una frecuencia que no afecta al análisis del sistema. En general, las mediciones se analizaron contemplando el rango de frecuencias entre 500 y 20000 Hz. En este rango, el nivel equivalente de ruido se encuentra por debajo de 20 dB SPL. Por lo tanto, considerando que la sensibilidad del driver es de 106 dB @ (1W, 1m) las condiciones de medición en cuanto a la relación señal a ruido fueron óptimas.

4. CONCLUSIÓN

Se considera que las mediciones realizadas representan el comportamiento del sistema. En el eje horizontal, la bocina logra mantener una directividad constante entre 1.5 kHz y 12 kHz. Estos límites están dados por las dimensiones de la bocina y por la directividad del driver. En el eje vertical, si bien tiene un ángulo de cobertura menor, la directividad presenta menos irregularidades debido a la forma de la bocina.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] B&C DE400TN Datasheet. <https://www.bcspeakers.com/en/products/hf-driver/1-0/8/de400tn-08>
- [2] B&C ME20 Datasheet. <https://www.bcspeakers.com/en/products/horn/1-0/0/me20>
- [3] Limp "Limp User Manual" <https://www.artalabs.hr/download/LIMP-user-manual.pdf>