

Análisis de un sistema driver-bocina

Areco Franco - francoareco53@gmail.com
Lopez Lautaro - lautarolopez.20@gmail.com

Ingeniería de Sonido, Universidad Nacional de Tres de Febrero

Resumen – En el presente informe se analiza una serie de mediciones llevadas a cabo sobre un sistema driver-bocina con el objetivo de estudiar la directividad del mismo. Se desarrolla un código en el lenguaje Python con el fin de procesar los datos obtenidos de las mediciones y visualizar la respuestas en frecuencia y patrones directivos. Estos datos abarcan la respuesta del sistema desde distintos ángulos.

1. INTRODUCCIÓN

Este informe tiene el objetivo de estudiar el comportamiento electroacústico de un sistema compuesto por un driver de compresión en una bocina. El driver estudiado es el modelo DE620TN y la bocina utilizada es el modelo ME90, ambos de la marca B&C con un diámetro de garganta de 1.4 pulgadas. Las mediciones se realizan con un micrófono Earthworks M50 y una mesa giratoria Outline ET230.

A partir de una serie de mediciones acústicas, se procesan los resultados de las mismas mediante scripts realizados en Python. De esta manera, se logra visualizar la directividad del sistema con la bocina en los diferentes ángulos dentro de una sala no ideal, el cual se presenta por medio de un gráfico polar y uno de contorno. A partir de estos resultados, se obtiene la respuesta en frecuencia del driver-bocina.

Del mismo modo, se obtiene el nivel de ruido de fondo de la sala al momento de realizar dicha medición. Asimismo, es representada por medio del nivel equivalente LEQ sin ponderar por bandas de tercio de octava.

2. METODOLOGÍA

El primer análisis parte de una serie de mediciones de los sistemas driver-bocina conformado por el driver de compresión DE620TN y la bocina ME90. Estos elementos pueden observarse en la figura 1 y 2.



Figura 1: Driver de compresión DE620TN

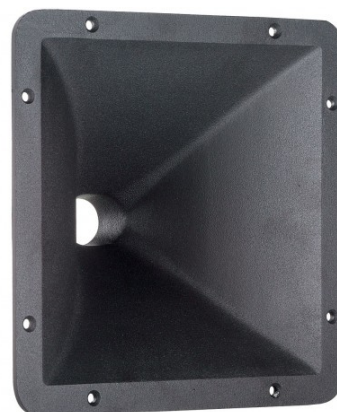


Figura 2: Bocina ME90

Según sus hojas de datos (datasheet), los parámetros del driver de compresión y de la bocina se observan en las tablas 1 y 2 respectivamente. El ancho y la altura hacen referencia a las dimensiones de la boca y f_C es la frecuencia de corte inferior de la bocina.

Tabla 1: Especificaciones bocina ME90

Altura [mm]	Ancho [mm]	Profundidad [mm]	fc [kHz]	Material
270	270	138	0.9	Aluminio

El driver de compresión utilizado presenta las siguientes especificaciones

Tabla 2: Especificaciones Driver de compresión DE620TN

D_g [mm]	Ancho de banda [kHz]	Sensibilidad [dB]
270	138	107.0

Donde D_g hace referencia al diámetro de garganta del driver.

Esta dimensión es idéntica a la de la garganta de la bocina, por lo tanto estos elementos son compatibles entre sí. De esta forma, se logra que todo el campo acústico producido por el driver sea guiado a través de la bocina, manteniendo al mínimo las reflexiones que se generarían por un cambio de sección (de impedancia) en la unión entre los elementos.

2.1. Medición de impedancia

En primer lugar, se calibran los canales de entrada de la placa de audio RME Fireface UCX. Esto se realiza con el software LIMP conectando la salida de la placa en conjunto con los dos canales de entrada. Posteriormente, se procede a calibrar, mediante el software, los canales de entrada.

Para llevar a cabo la medición del driver, se realiza el circuito de la figura 12 al cual se le añade una resistencia de 150 Ω donde el mismo software compensa dicha resistencia agregada.

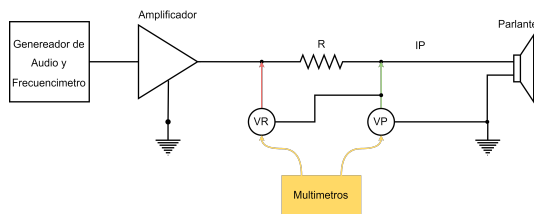


Figura 3: Circuito para medición de curva impedancia del driver DE620TN

Una vez realizado dicho circuito, se somete al driver a un sweep de 20 a 20kHz para obtener la respuesta de impedancia del sistema con y sin bocina.

2.2. Gráfico de contorno y respuesta polar

Una vez montado el driver en la bocina, el cual se encuentra sobre la mesa giratoria, se procede a generar un sweep con un ancho de banda de 1k a 20 kHz, filtrado mediante el software de la placa de audio, para obtener la respuesta del sistema.

A partir de las mediciones del sistema a diferentes ángulos (0° - 180°), con pasos de 5° tanto en el eje horizontal como el vertical, se realiza un script en el lenguaje Python para el procesamiento de las mediciones. De esta forma, se obtienen los gráficos.

Cabe mencionar que el eje de rotación del sistema se encuentra sobre la bocina con el fin de capturar los diferentes tipos de ángulos

Las respuestas al impulso en formato pir se exportan a formato txt. Las mismas se importan en el código.

A todas las mediciones se le aplica la misma ventana temporal en base a la distancia de medición, ya que solo se busca obtener la respuesta del sistema, sin las reflexiones del recinto. Luego, se calcula la magnitud de la respuesta en frecuencia en nivel de presión sonora, mediante la FFT para cada medición de respuesta al impulso y se procede a normalizar dichas curvas tomando como referencia la respuesta del eje 0° .

El gráfico de contorno brinda información de la direccionalidad del elemento en función de la frecuencia y el ángulo con respecto al eje 0° , con un mapa de color que describe el nivel de presión relativo. Esto se realiza ya que se desea conocer como se reduce el nivel respecto del eje 0° , para cada punto (x, y) donde x es la frecuencia medida e y es el ángulo de medición respecto al eje. El gráfico de respuesta polar describe como el elemento irradia energía en el espacio, tomando como referencia el eje 0° . A diferencia del gráfico de contorno, cada curva de respuesta es a una frecuencia en particular.

2.3. Respuesta en frecuencia en SPL

Se realiza un gráfico de nivel de presión sonora en función de la frecuencia para distintos ángulos de radiación.

Mediante la misma base de datos, con las respuestas al impulso en formato txt, se seleccionan las respuestas en los ángulos de 0° , 15° , 30° y 45° .

Para adquirir el valor de presión sonora se realiza una calibración utilizando una señal de referencia capturada durante la medición de las bocinas. Esta es una señal senoidal de 1 kHz que representa 1 Pa (94 dB_{SPL}). Se calcula el valor RMS de dicha medición y se normalizan las respuestas al impulso en los ángulos seleccionados en base a ese valor. Consecuentemente, se calcula la representación en el dominio frecuencial de estas señales normalizadas a través de la transformada rápida

de Fourier (FFT). En el proceso de conversión, a través de la FFT, se hace un zero-padding para aumentar la resolución frecuencial.

Con el fin de calcular el valor de nivel de presión sonora, se divide a la magnitud de cada respuesta en frecuencia por la presión de referencia de $20 \mu\text{Pa}$ y entonces el nivel de presión sonora se calcula como se observa en la ecuación 1:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{X_{rms}}{20 \mu\text{Pa}} \right) \quad (1)$$

Este proceso se repite para ambas bocinas y en sus ángulos verticales y horizontales.

2.4. Nivel de ruido de fondo

En esta sección, se desarrolla un script para poder obtener el nivel de ruido continuo equivalente LEQ sin ponderación por bandas de tercio de octava, con el fin de obtener información sobre el nivel de ruido de la medición provista. El proceso consiste en importar dos archivos en formato wav, uno con la señal de calibración provista por un calibrador el cual provee una señal de frecuencia 1 kHz, 94 dB SPL correspondiente a 1 pascal. La otra señal corresponde a la medición del ruido de fondo.

En primer lugar, se normaliza la señal de ruido tomando como referencia el valor cuadrático medio de la señal de referencia. Luego, dicha señal se filtra por tercios de octava empleando una función, la cual utiliza filtros digitales para crear dicho filtro. las frecuencias centrales y frecuencias de corte se definen según la normativa IEC (61260 - 1995). Luego, se calcula el valor RMS de cada señal filtrada y se utiliza la ecuación 2 para obtener el valor LEQ en decibelios sin ponderación.

$$LEQ_{dBZ} = 20 \log_{10} \left(\frac{X_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (2)$$

Se toma como referencia el umbral de audición de $20 \mu\text{Pa}$. Luego, se presenta un gráfico de barras que relaciona el nivel LEQ en función de las 29 bandas solicitadas que van desde (25 - 16k) Hz. Para corroborar el correcto funcionamiento del código, se utiliza una señal de prueba con su respectiva señal de calibración y se comparan los resultados con una tabla provista en la que se utilizó un sonómetro clase 1 SVAN 959.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenido, se debe mencionar lo que respecta tanto a las dimensiones de la sala medida como la posición del micrófono, ya que está influirá en la medición.

La posición del micrófono debe ser igual o mayor a tres veces la mayor dimensión del sistema. Considerando a la diagonal de la bocina como la dimensión más grande del sistema (dimensión de la diagonal: 38,18 cm), la medición se considera en campo lejano. Para esto, el micrófono se posiciona a una distancia de 1,14 m de la fuente. Esto se realiza con el fin de captar al sistema como una sola fuente y no captar tanto fuentes puntuales ó difracciones entre la unión del driver - bocina.

En la tabla 3 se observan las dimensiones de la posición del micrófono y el driver

Tabla 3: Dimensiones de sala y de la posición del micrófono y driver + bocina

Sala	x	2.8	m	Mic	x	1.4	m
	y	4.5	m		y	2.78	m
	z	2.5	m		z	1.2	m
Driver + Bocina	x	1.4	m				
	y	1.68	m				
	z	1.2	m				

3.1. Medición de impedancia

El fabricante brinda la curva de impedancia aunque, en este tipo de transductores, no suele brindar información precisa a excepción de la resonancia mecánica.

La impedancia eléctrica en el caso del driver de compresión, con o sin bocina, no agrega información de tanta calidad como lo era del altoparlante al aire libre.

Esto se debe a que no se diseña un gabinete al driver, ya que el mismo esta cerrado.

En la Figura 4 se observa una resonancia mecánica definida entre 600 Hz y 700 Hz a partir de la cual el driver comienza a responder.

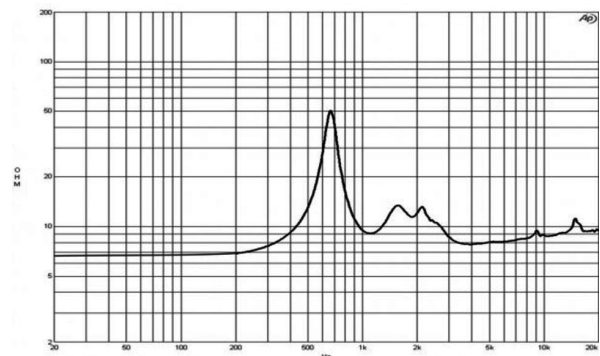


Figura 4: Curva de impedancia driver DE620TN brindada por el fabricante

Las curvas de impedancias que se miden se observan en la figura 5 y con bocina incluida en la figura 6

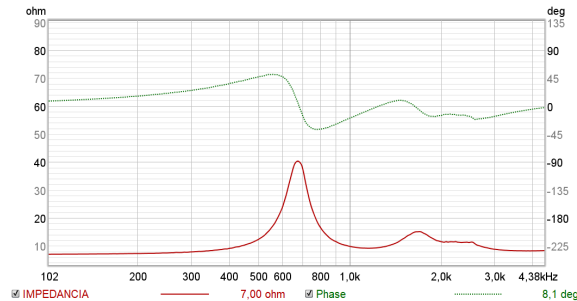


Figura 5: Curva de impedancia del driver DE620TN medida

La frecuencia de resonancia se encuentra en 670 Hz aproximadamente. El segundo pico que se encuentra a la derecha se ubica en los 1670 Hz.

La diferencia entre la curva medida con la del fabricante es que no aparecen las pequeñas reflexiones en frecuencias altas.

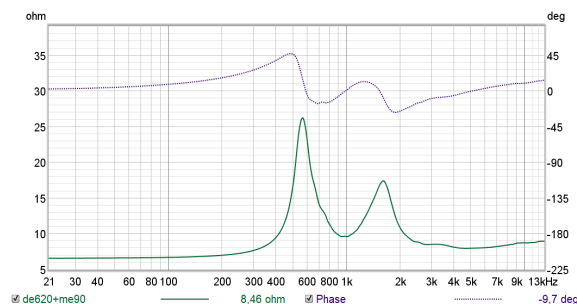


Figura 6: Curva de impedancia del driver DE620TN montado en la bocina M90

Cuando se monta la bocina en el driver se puede observar que el pico de la resonancia cambia a 570 Hz y su amplitud aumenta. Además, se convierte en un elemento mas selectivo (ancho de banda menor). Lo mismo sucede con el segundo pico, el cual ahora se encuentra en 1700 Hz. En conclusión, los dos picos crecieron.

Una de las grandes diferencias es que ahora el elemento mecánico ya no esta radiando al aire libre. El sistema esta radiando por su cara trasera un gabinete cerrado y, en su cara delantera, a través de un corrector de fase, hacia una cámara de compresión y de ahí a la salida. Esto quiere decir que en el corrector de fase, y en la boca de salida, hay cambios de impedancia. Al haber cambios de impedancias, aparece una cantidad de energía transmitida y reflejada. La suma de ambas es la energía total. Esto trae como consecuencia que haya posibles puntos de resonancias.

En este caso, la bocina tiene la misma dimensión (superficie) que la boca de salida, por lo que tenemos una continuidad de impedancia.

Esto significa que no se genera una onda reflejada y, por esta razón, en la respuesta no hay deformaciones.

3.2. Respuesta en frecuencia de SPL

En la Figura 7 se observa la respuesta en frecuencia del driver de compresión, donde el ancho de banda abarca desde 1 kHz hasta los 18 kHz.

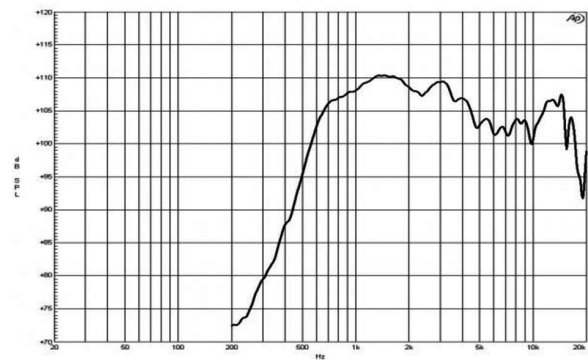


Figura 7: Respuesta en frecuencia driver DE620TN según hoja de datos

En cuanto a la bocina, está hecha de aluminio fundido. Como la superficie de salida del driver es igual que la superficie de entrada de la bocina, se logra generar una continuidad y, de esta manera, se evita un salto de impedancia. Esto es positivo, ya que el sistema no va a reflejar energía (energía que regresa hasta el driver y cancela la suma de señales en caso de que las superficies fueran distintas).

Por otro lado, mediante la velocidad de sonido el cual se considera como 343 m/s, se calcula cual es la primera reflexión que llega al parlante. Esto se realiza con el fin de obtener el tamaño de la ventana y así obtener una medición cuasi-anecoica.

Para llegar a obtener el valor de la primera reflexión se toma los ángulos principales (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°) y se llega a que dicha reflexión se da en el eje.

Por medio de las dimensiones de la tabla 3, se puede obtener que la primera reflexión llegará proveniente del piso. Esta reflexión se puede calcular según la ecuación 3.

$$D_T = \left(2\sqrt{\left(\frac{1,1 \text{ m}}{2}\right)^2 + 1,2^2 \text{ m}} \right) - 1,1 \text{ m} = 1,54 \text{ m} \quad (3)$$

El tiempo de la primera reflexión se calcula a través de la ecuación 4.

$$T = \frac{1,54 \text{ m}}{343} = 4,49 \text{ ms} \quad (4)$$

La reflexión de la pared trasera al micrófono llega dentro de los 7.10 ms aproximadamente; la reflexión de pared lateral a los 5,56 ms y la reflexión del piso a los 4,49 ms, siendo ésta última la más temprana. De esta manera, se decide tomar este criterio para hallar la primera reflexión.

Al analizar la respuesta al impulso en el ARTA se observa que dicha reflexión se da a 5.08 ms, por lo que el criterio mencionado es correcto.

Con el fin de tener una buena resolución en frecuencia de 20 Hz, se toma un tamaño de ventana igual a 2400 muestras, es decir, que se realiza zero padding con el fin de mejorar la resolución de la respuesta al impulso recortada.

Las curvas de respuesta en frecuencias presentan un suavizado aplicando un filtro de media móvil para permitir una mejor visualización de la respuesta en el rango de frecuencias más altas (15 kHz a 20 kHz).

Los resultados de la respuesta en frecuencia se grafican para los ángulos de 0°, 15°, 30° y 45° tanto para el comportamiento horizontal Figura 8 como para el vertical Figura 9. A su vez, estos gráficos se presentan a partir de los 500 Hz debido a que el fabricante reporta esta información a partir de 200 Hz (siendo esta frecuencia su límite en resolución para la medición). Además, como el driver responde a partir de alrededor de 800 Hz no se considera coherente mostrar resultados y analizar por debajo de esta frecuencia.

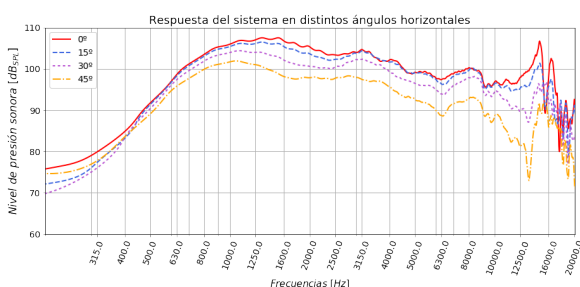


Figura 8: Respuesta en frecuencia DE620TN con bocina ME90 (horizontal).

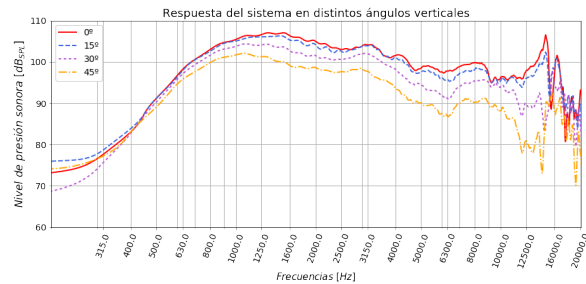


Figura 9: Respuesta en frecuencia DE620TN con bocina ME90 (vertical).

En las figuras 8 y 9 el nivel de presión sonora que irradia el sistema, a medida que se aleja del eje central de 0°, decrece con mayor rapidez si la rotación de ángulo se realiza en el sentido vertical. Esta característica suele estar presente en la mayoría de las bocinas debido a que, generalmente, se requiere un ángulo de cobertura mayor en el eje horizontal que en el eje vertical ya que la directividad es mayor en el eje horizontal.

Se puede observar que, tanto en el plano horizontal como en el vertical, la respuesta del eje es la misma. Esto tiene sentido ya que se está tomando el mismo punto del espacio, por lo cual esto da la pauta de que el elemento está bien posicionado al momento de realizar la medición. De la misma manera, se puede observar en ambas figuras que presentan ondulaciones por la onda reflejada de la bocina.

Comparando ambas respuestas en el eje, con la respuesta en frecuencia brindada por el fabricante, se puede observar que en dicha especificación el nivel máximo llega a 110 dB mientras que en la medición realizada en ambos ejes el nivel máximo es de 108 dB. Del mismo modo, entre el rango de frecuencia de 5 kHz a 20 kHz, se presenta una diferencia de 10 dB respecto de la especificación del fabricante, esto se puede deber al posicionamiento del driver-bocina, al inmobiliario de la sala, entre otras cosas.

Con respecto a las resonancias, la primera aparece en la frecuencia de 1,6 kHz. Comparando con los datos brindados por el fabricante, podemos observar dicho comportamiento.

El nivel de presión sonora varía alrededor de esta frecuencia debido a la medición realizada y al procesamiento realizado para obtener dichas curvas (FFT, suavizado de curva).

Esta resonancia se encuentra en las cercanías de la frecuencia, para la cual la bocina comienza a estar en su zona de trabajo. Asimismo, en esta zona, se confina el sonido dentro de las paredes de la bocina. Al funcionar como guía de onda aumenta el Q y, en consecuencia, provoca un incremento en el nivel de presión sonora y el surgimiento de una resonancia en el inicio. La zona

activa de la bocina termina en la frecuencia de corte superior, determinada por el motor de compresión debido al efecto de la masa mecánica. Esto quiere decir, que se debe al efecto de la inercia.

Luego, en el rango de frecuencias medias-altas, el gráfico presenta ciertas resonancia en las frecuencias de 2.8 kHz, 3.8 kHz, 5.8 kHz y 7.6kHz. Estas resonancia son similares a las especificadas por el fabricante. Estas resonancias, se originan por sumas y cancelaciones en la boca de la bocina, por ende al deberse a la onda reflejada este está estrechamente ligada al largo de la bocina.

En relación a las frecuencias mayores a 12.5 kHz, se puede observar que la curva comienza a decaer con picos abruptos. Luego, en 15 kHz se observa una resonancia que se puede constatar con la curva de impedancia brindada por el fabricante y también se observa en la curva de respuesta en frecuencia brindada. Del mismo modo, se puede observar un decaimiento abrupto del nivel (mayor a 20 dB) el cual se debe principalmente al break up del diafragma, por lo cual cada transductor va a ser diferente. Es por esto que el fabricante realiza un suavizado, con el fin de no detallar a fondo este rango de frecuencia.

La caída que comienza a partir de 15 kHz, se debe a la reactancia de la cámara de compresión que, a medida que aumenta la frecuencia, tiende disminuir su valor y cortocircuita la impedancia de radiación, disminuyendo el nivel de presión sonora hacia el final de la respuesta del sistema (20 kHz).

En todas las respuestas se observa un valle alrededor de los 2.8 kHz, 3 kHz. Esta caída de presión puede deberse a un comportamiento propio del driver. Esto posiblemente es debido a que el largo de la bocina es similar a la longitud de onda de 2.8 kHz, como se menciono anteriormente, provocando una onda reflejada que causa una reducción de SPL aún mayor. En el caso de la respuesta horizontal, el nivel de presión sonora a 0°, 15°, 30° y 45° es prácticamente el mismo. Esto conlleva a un aumento del ángulo de cobertura alrededor de los 3 kHz. Este fenómeno se observa claramente en el gráfico de contorno (próxima sección).

Asimismo, se observa en todos los ángulos que la banda de paso del sistema comienza a partir 1700 Hz. Cabe destacar que, la frecuencia a la que la presión alcanza este valor está ligada a la frecuencia de corte de la bocina, la cual está ligada a las dimensiones del elemento. En general, salvo en bocinas exponenciales, una bocina con una superficie de boca mayor poseerá una frecuencia de corte menor (en comparación a otra bocina del mismo largo), debido a que podrá adaptar la impedancia de forma más eficiente a frecuencias bajas, haciendo que la energía se transforme mayormente en energía activa (presión sonora) que en energía reactiva.

En la Figura 8 y 9 se observa que la banda de paso del sistema comienza a partir de 1.7 kHz para la bocina ME90. En base a esta observación, y sabiendo que la carga es mayormente resistiva a partir de dos veces la frecuencia de corte de la misma, se estima que esta última se encuentre ubicada alrededor de los (800 - 900) Hz.

Sabiendo que la bocina ME90 no se puede caracterizar como una bocina del tipo exponencial, con fines de poder estudiar la carga acústica que ésta representa al sistema se calcula el valor de ensanchamiento (m) y la frecuencia de corte. A partir de dicha frecuencia la bocina comienza a funcionar como adaptador de impedancias, mejorando el rendimiento del sistema. Para dicha bocina, asumiéndola como exponencial, el valor de m resulta de $31,14 \frac{m}{s}$ lo cual deriva en una frecuencia de corte de 850 Hz. Con estos datos se espera que, a partir del doble de esta frecuencia 1700 Hz, la bocina esté totalmente cargada y actúe en conjunto con el driver de compresión.

$$m = \frac{f_c 4\pi}{c} = \frac{850 \text{ Hz } 4\pi}{343 \frac{m}{s}} = 31,14 \frac{m}{s} \quad (5)$$

Esta bocina no tiene un ensanchamiento puramente exponencial. Esto se debe a que presenta perfiles diferentes en los planos vertical y horizontal.

Cabe destacar que el fabricante indica, en la hoja de datos, que las bocinas presentan una “excelente carga acústica” desde el mismo valor que la frecuencia de corte que se especifica, el cual es de 900 Hz.

$$m = \frac{f_c 4\pi}{c} = \frac{900 \text{ Hz } 4\pi}{343 \frac{m}{s}} = 32,97 \frac{m}{s} \quad (6)$$

De este modo, la frecuencia de corte, que se especifica en el datasheet de la bocina ME90, probablemente no difiera a la frecuencia de corte teórica, ya que la carga acústica comienza a considerarse mayormente activa a partir de 2 veces la frecuencia de corte y se puede observar que la frecuencia de corte es similar.

3.3. Ruido de Fondo

Para realizar el diseño de los filtros de tercio de octava se utiliza la función `signal.butter` y `signal.sosfilt` de la librería `scipy`. Cabe mencionar que los filtros son digitales de tipo Butterworth orden 6 debido al ancho de banda necesario para filtrar por tercios de octava. Según la normativa, para medir niveles de presión, al menos deben ser de orden 3. Se utilizan para filtrar la señal de ruido normalizada con la señal de calibración. Luego, se calcula el valor rms de la señal filtrada por bandas y se utiliza la ecuación 2

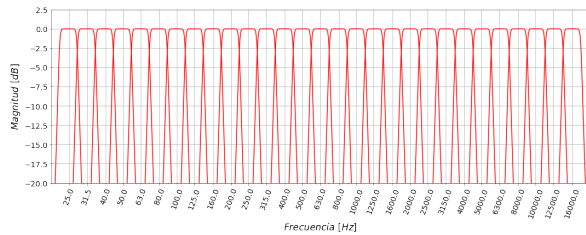


Figura 10: Filtro de tercio de octava. Filtros buttherworth de orden 6

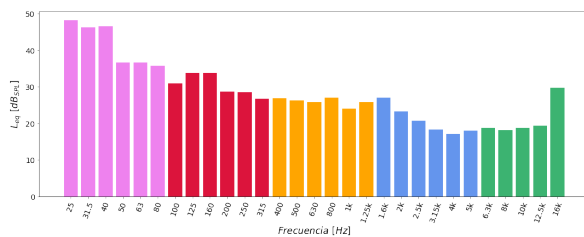


Figura 11: Nivel de la señal de ruido por bandas de tercios de octava al inicio de la medición.

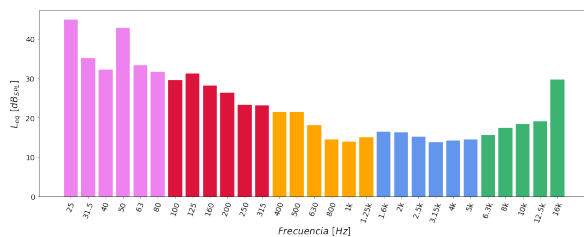


Figura 12: Nivel de la señal de ruido por bandas de tercios de octava al final de la medición.

Para este caso el nivel de ruido continuo equivalente por encima de 800 Hz es menor a 40 dB, un nivel aceptable para una medición si el elemento a medir trabaja en un rango de frecuencias superiores a esta banda. Por el contrario, si el elemento a medir trabaja por debajo de la banda antes mencionada, no se podría realizar una medición objetiva con niveles tan elevados de ruido, a menos que se ajuste la fuente a un nivel muy elevado. Esto último puede acarrear otros problemas, como distorsión. Del mismo modo, esto nos da también una pauta del nivel a utilizar en la medición.

3.4. Gráfico de contorno y polar

Para llevar a cabo la obtención de la respuesta del sistema sin la intromisión de la sala, como se explico anteriormente, se aplica una única ventana temporal de 4.49 ms a todas las respuestas considerando el instante en donde inicia la respuesta al impulso.

La ventana se elige en base a dos factores: la primer reflexión captada por el micrófono (reflexión del piso) y, en segundo lugar, elegir la ventana temporal más chica que excluya todas las reflexiones de las 37 respuestas al impulso registradas. Cabe mencionar que esta última es menos precisa debido al error humano, pero suele ser buena aproximación.

En las respuesta al impulso existen 6 ms. Antes de dicha IR, en donde no agrega información, la rotación de fase será igual en todas las respuesta al impulso en donde esté libre de reflexiones (IR ventaneadas). Por lo tanto, la frecuencia mínima a representar por la FFT será de 222,72 Hz. Por lo cual, esto no traerá problemas debido a que, en la figura 5, en la curva de impedancia (medida del driver) la resonancia se encuentra alrededor de los 680 Hz.

En la figura 13 y 14 se puede observar que tanto en la medición polar horizontal y vertical para las frecuencias de 800 Hz y 1 kHz presenta una homogeneidad, ya que la respuesta en estas frecuencias son similares.

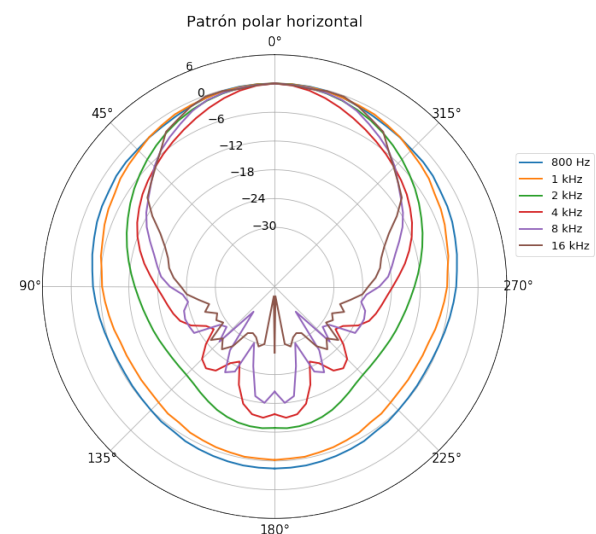


Figura 13: Respuesta polar horizontal de DE620TN con bocina ME90.

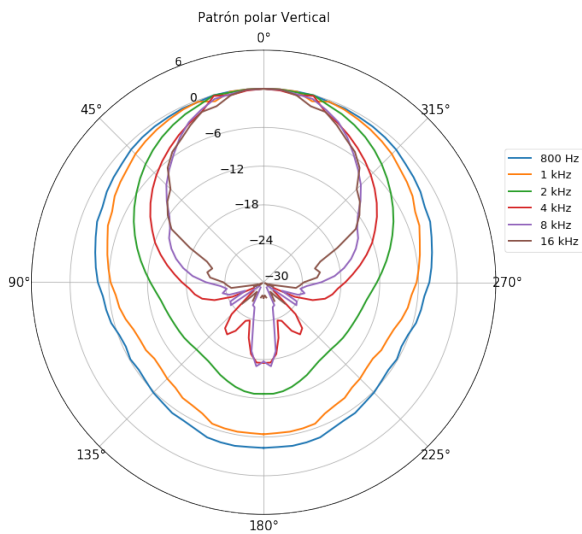


Figura 14: Respuesta polar vertical de DE620TN con bocina ME90.

Para las siguientes frecuencias, se puede observar cómo a medida que aumenta la misma, su ángulo de cobertura se vuelve más estrecho. A partir de la frecuencia de 2 kHz se va notando una diferencia entre el gráfico polar vertical y horizontal. Entonces, a medida que aumenta dicha frecuencia, esta diferencia se vuelve más notable.

Para la banda de 16 kHz el sistema es más direccional en el eje vertical que en el eje horizontal.

Por lo tanto, considerando el diámetro de la garganta, se observa en la figura 13 y 14 que la bocina controla la respuesta direcciva del driver hasta que la longitud de onda de la señal se torna comparable al diámetro de la garganta. Esto se puede observar a partir de 16 kHz, en donde el sistema se vuelve más direccional al ser comparable con dicha longitud de onda, cuya frecuencia es de 12,7 kHz. Del mismo modo, se observa que la bocina es menos direccional en el eje horizontal que en el vertical. Esto se debe a que el ángulo de apertura horizontal es mayor.

El datasheet proporciona gráficos del patrón polar (tanto vertical como horizontal), esto se puede observar en las figuras 15 y 16

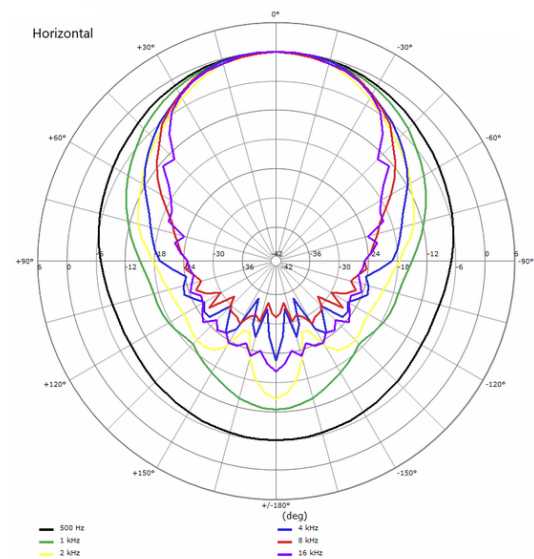


Figura 15: Gráfico de respuesta polar horizontal bocina B&C ME90 según datasheet.

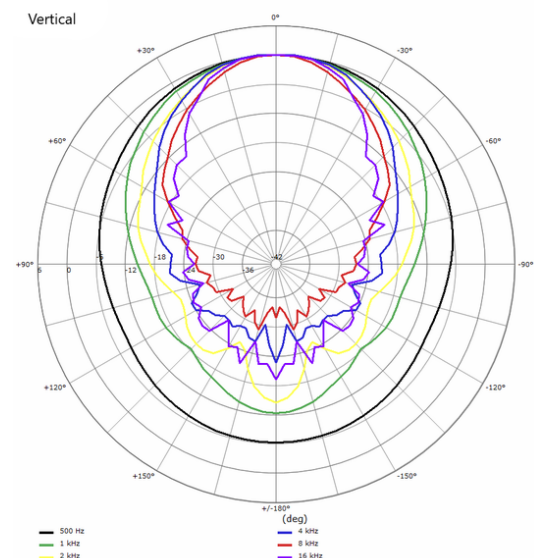


Figura 16: Gráfico de respuesta polar vertical bocina B&C ME90 según datasheet.

En comparación con la medición, se puede observar que, si bien la respuesta del gráfico polar brindados por el fabricante son similares al medido, existe una diferencia sustancial en altas frecuencias. Esto se debe a que el fabricante suele suavizar dichas curvas producto a lo analizado en la sección de respuesta en frecuencia. Pero, con respecto a las frecuencias menores a 16 kHz, la respuesta es similar.

En la figura 17 y 18 puede apreciarse que, tanto en el plano horizontal como vertical, el comportamiento del sistema es prácticamente simétrico a excepción de la zona de frecuencias altas donde se presentan leves discrepancias. Esto se debe a que, en dichas frecuencias, la directividad de la bocina (posicionada en forma vertical) produce una disminución de directividad del sistema.

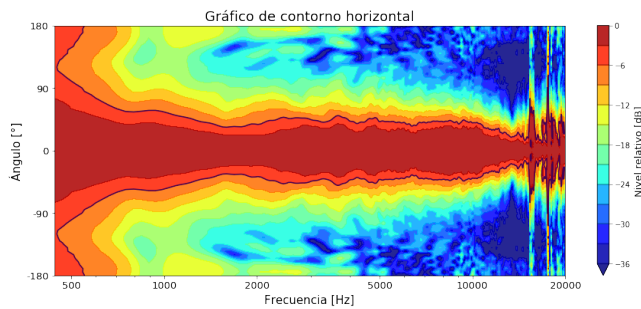


Figura 17: Gráfico de contorno horizontal bocina B&C ME90.

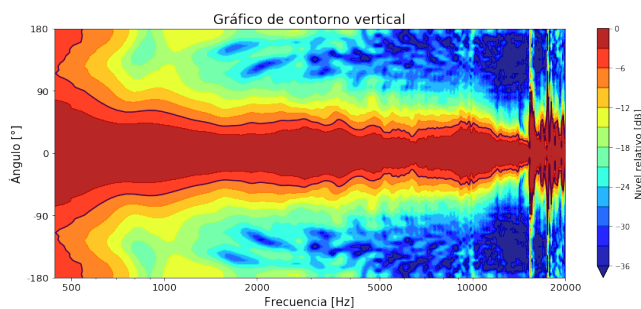


Figura 18: Gráfico de contorno vertical bocina B&C ME90.

En ambas figuras, se puede observar que alrededor de los 1800 kHz el sistema es más directivo y luego disminuye su directividad. Este fenómeno no es deseable, ya que la diferencia de nivel entre 1.8 kHz y 3 kHz es considerable.

El ángulo de cobertura decrece a medida que aumenta la frecuencia, hasta llegar a una zona donde la directividad se hace relativamente “constante”. Luego, en las frecuencias más altas, se produce una disminución de la directividad.

A partir de los 15 kHz aproximadamente se producen picos que no se corresponden con la respuesta esperada de una bocina para altas frecuencias. Esto se debe principalmente al break up del diafragma, donde será distinto para cada driver. En dicha zona, debido a que la longitud de onda se hace muy chica con respecto a las dimensiones de la bocina, la onda deja de ser guiada por las paredes y el ángulo de cobertura disminuye.

La frecuencia de directividad se puede definir como aquella donde la bocina mantiene una directividad

constante, que es donde la misma se encuentra en su zona útil. Esto se da alrededor de los 3000 Hz. Por lo tanto, a partir de las mediciones, el ángulo de cobertura del sistema definido en -6 dB es de 80° horizontal y 60° en vertical. esto ultimo considerando la zona útil de la bocina, es decir, en un rango de 3 kHz a 10 kHz.

El datasheet proporciona gráficos de contorno (tanto vertical como horizontal) en el caso de la bocina. Esto se observa en las figuras 19 y 20

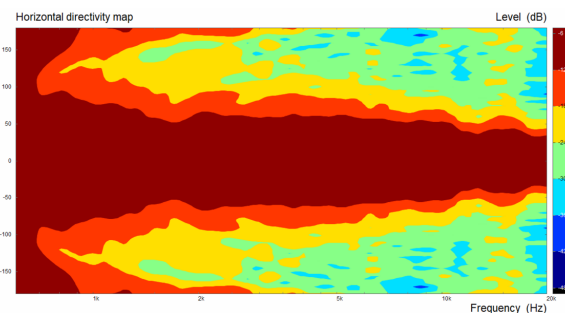


Figura 19: Gráfico de contorno de driver DE620TN con bocina M90 horizontal según fabricante

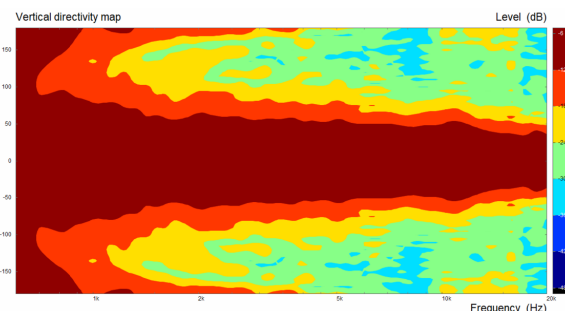


Figura 20: Gráfico de contorno de driver DE620TN con bocina M90 vertical según fabricante

En comparación al gráfico de contorno brindado por el fabricante, se puede observar que la respuesta del sistema en ambos ejes es similar. En las figuras 19 y 20, en altas frecuencias, tiene un mejor desempeño, ya que dicho comportamiento es ideal. Esto se debe a que, según lo observado, el driver no presenta resonancias propias de su mismo material (según gráfico del fabricante). Pero esto último se encuentra suavizado con el fin de que no se observe el cone break up del driver.

Finalmente se observa que, tanto en la figura del eje vertical como horizontal, el ángulo de cobertura es similar al medido.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, se logra obtener resultados coherentes con lo aportado por el fabricante. Se obtienen similitudes gráficas, tanto en la curva de impedancia medida como la respuesta en frecuencia del driver montado en la bocina ME90.

Con respecto a la respuesta en frecuencia del sistema, se logra analizar la frecuencia de corte de la bocina. Esta se observa cuando la misma se encuentra cargada totalmente. Esto sucede a dos veces la frecuencia de corte de la bocina, por lo cual se puede aproximar a dicha frecuencia.

Se comparan los índice de ensanchamiento (m) del fabricante con respecto al medido y los resultados son similares, con una diferencia de 50 Hz.

Por otro lado, las diferencias entre el eje vertical y el horizontal pueden apreciarse mas en el gráfico de contorno. En estos gráficos, se hace notoria la diferencia de directividad entre un eje y el otro. Esto se da a medida que aumentan los ángulos. En el eje son lo mismo porque se encuentran en el mismo punto del espacio (siempre y cuando la bocina este bien posicionada).

La respuesta del sistema se ve limitada en bajas frecuencias por la frecuencia de corte inferior de la bocina y en altas por el corrector de fase y la cámara de compresión. Cuando la frecuencia a reproducir se encuentra en la última octava de la banda audible, el corrector de fase no podrá generar un disco de presión con todos sus puntos a la misma fase en la garganta. Es por eso que su respuesta en frecuencia presenta irregularidades.

La respuesta en frecuencia, por encima de los 15 y 16K Hz, se decide no analizar. Esto se debe a que, en esta zona, se generan resonancias sobre la materia del driver. Estas resonancias se deben al break up del mismo elemento. Por esta razón se realiza un suavizado mediante un filtro de media móvil con el fin de observar una mejor resolución en altas frecuencias. Esto mismo es realizado por el fabricante.

En relación al análisis de directividad, se puede observar que el gráfico de contorno dispone de ciertas diferencias tanto para el eje vertical como para el horizontal, siendo este último de menor directividad en las altas frecuencias. Por lo cual, se puede establecer un ángulo de cobertura del sistema (-6 dB) de 80° en el eje horizontal y de 60° en el eje vertical, similar a lo brindado por el fabricante B&C. En cuanto a la respuesta polar del sistema, cabe mencionar que para ambos ejes el comportamiento en bajas frecuencias es similar, mientras que en altas frecuencias esto no sucede ya que allí se observa que la directividad es mayor en el eje vertical que en el eje horizontal.

Como posibles mejoras a futuro, sería interesante realizar la medición de directividad con el fin de obte-

ner el baloon y allí observar la directividad en forma de esfera completa.

Finalmente, en cuanto al código implementado, también se propone realizar una mejora del mismo para dicho script sea optimizado. Además, a futuro se logrará mejorar la identificación de las reflexiones en las respuestas al impulso para que pueda realizarse de forma automática en vez de tener que recurrir a la observación de la forma de onda de cada medición para determinar el corte de la ventana necesario.

Referencias

- [1] B&C, Hoja de datos de driver DE620TN.
- [2] B&C, Hoja de datos de bocina ME90.
- [3] L. L. Beranek, *Acoustics*, **1954**.
- [4] L. L. Beranek y T. Mellow, *Acoustics: Sound fields and transducers*, **2014**.

A. ANEXO

Tabla 4: Comparación entre el ruido de fondo medido por sonómetro y con el código desarrollado.

Frecuencia [Hz]	L_{eq} dB _Z obtenido desde sonómetro Svan 959	L_{eq} dB _Z obtenido desde código con señal de referencia	Diferencia entre ambos métodos
25	48,45	48,11	0,34
31.5	54,87	54,87	0
40	67,79	67,74	0,05
50	68,54	68,44	0,1
63	64,09	64,03	0,06
80	65,77	65,77	0
100	71,61	71,57	0,04
125	70,95	70,79	0,16
160	72,68	72,59	0,09
200	72,15	72,06	0,09
250	71,31	71,22	0,09
315	72,73	72,78	-0,05
400	73,27	73,2	0,07
500	68,21	67,98	0,23
630	69,27	69,26	0,01
800	68,13	68,06	0,07
1000	66,93	66,85	0,08
1250	66,42	66,39	0,03
1600	65,3	65,24	0,06
2000	67,46	67,43	0,03
2500	67,22	67,12	0,1
3150	67,54	67,5	0,04
4000	68,54	68,49	0,05
5000	66,88	66,8	0,08
6300	64,35	64,31	0,04
8000	62,57	62,48	0,09
10000	61,56	61,52	0,04
12500	57,33	57,26	0,07
16000	52,77	52,68	0,09