

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Control de la directividad de un
line array con ancho de banda
constante”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
Bárbara Gil Altur

Tutor/a:
Rubén Picó Vila
Francisco Sales Castells Ramón

GANDIA, 2021

ABSTRACT

In this TFG the design, conception and characterization of a public address line array for installations in closed environments with complex acoustics is proposed. The objective is to increase the intelligibility of sound in voice alarm control installations and evacuation systems in certain facilities such as port and airport terminals, train stations, tunnels, etc... The approach that is proposed for the improvement of the intelligibility consists of controlling the directivity of the line array using the concept of CBT (Constant Beamwidth Transducer). For this, a modular electroacoustic system is proposed, configured from the distribution in a periodic network of a basic module. The first step consists of the acoustic characterization of the basic module in an anechoic chamber. This characterization includes frequency response and directivity. Subsequently, simulation software is used to estimate the field radiated by the set of loudspeakers arranged in the line array. Finally, the complete system will be characterized and its acoustic properties will be validated as a constant bandwidth device with acoustic simulations.

Keywords : CBT, loudspeaker array, directivity, omnidirectional.

RESUMEN

En este TFG se propone el diseño, concepción y caracterización de un arreglo lineal para megafonía para instalaciones en entornos cerrados con una acústica compleja. El objetivo es aumentar la inteligibilidad del sonido en instalaciones de control de alarmas por voz y sistemas de evacuación en determinadas instalaciones tales como terminales de puertos y aeropuertos, estaciones de trenes, túneles, etc., El planteamiento que se propone para la mejora de la inteligibilidad consiste en el control de la directividad del arreglo lineal utilizando el concepto de CBT (Constant Beamwidth Transducer en inglés). Para ello, se propone un sistema electroacústico modular configurado a partir de la distribución en redes periódicas de un módulo básico. El primer paso consiste en la caracterización acústica del módulo básico en cámara anecoica. Dicha caracterización incluye la respuesta en frecuencia y la directividad. Posteriormente se utiliza un software de simulación para estimar el campo radiado por el conjunto de altavoces dispuestos en el arreglo lineal. Finalmente, se caracterizará el sistema completo y se validarán sus propiedades acústicas como dispositivo de ancho de banda constante con las simulaciones acústicas.

Palabras clave : CBT, arreglo lineal, directividad, omnidireccional.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 5 |
| 2. Objetivos | 6 |
| 3. Fundamentos teóricos | 6 |
| 3.1 Definición de altavoz | 6 |
| 3.1.1 Partes de un altavoz | 7 |
| 3.1.2 Funcionamiento | 7 |
| 3.1.3 Recinto acústico..... | 8 |
| 3.1.4 Tipos de altavoces..... | 9 |
| 3.2 Definición de line array | 10 |
| 3.3 Definición concepto Constant Beamwidth Transducer (CBT) | 11 |
| 3.4 Definición de términos generales..... | 12 |
| 3.4.1 Impedancia eléctrica | 12 |
| 3.4.2 Respuesta en frecuencia..... | 13 |
| 3.4.2.1 Medición de la respuesta en frecuencia..... | 13 |
| 3.4.3 Potencia | 14 |
| 3.4.3.1 Potencia nominal | 15 |
| 3.4.3.2 Potencia admisible | 15 |
| 3.4.3.3 Potencia RMS..... | 15 |
| 3.4.3.4 Potencia de ruido..... | 15 |
| 3.4.4 Directividad y ángulo de cobertura | 16 |
| 3.4.4.1 El origen acústico | 16 |
| 3.4.4.2 El centro acústico | 16 |
| 3.4.4.3 El factor de directividad (Q) y el ángulo de cobertura..... | 16 |
| 3.4.4.4 Medición de la directividad..... | 17 |
| 3.4.5 Parámetros de Thiele-Small | 18 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5 | Apuntamiento electrónico..... | 23 |
| 4. | Desarrollo..... | 24 |
| 4.1 | Obtención de los parámetros de Thiele-Small..... | 24 |
| 4.2 | Obtención de la directividad..... | 29 |
| 4.3 | Obtención de la respuesta en frecuencia..... | 34 |
| 4.4 | Modelado del sistema base..... | 35 |
| 4.5 | Estudio de radiación del arreglo lineal..... | 38 |
| 4.5.1 | Apuntamiento electrónico..... | 39 |
| 4.5.2 | Constant Beamwidth Transducer (CBT)..... | 41 |
| 5. | Resultados..... | 44 |
| 6. | Conclusiones..... | 47 |
| 7. | Bibliografía..... | 48 |

1. Introducción

Entendemos la acústica como una rama de la física interdisciplinar que estudia el sonido, el infrasonido y el ultrasonido; así como la producción, la transmisión, la recepción, el control y la audición de las ondas sonoras [1]. Estas ondas sonoras, más bien denominadas ondas mecánicas, se pueden propagar a través de materia sólida, líquida o gaseosa y dependiendo también del medio, se propagarán a mayor o menor velocidad.

La ingeniería acústica, a su vez, es la rama de la ingeniería que se dedica a investigar las aplicaciones tecnológicas de la acústica propiamente dicha. Aunque dentro de ésta existen diferentes ramas, este proyecto se va a centrar en la rama de la electroacústica.

De acuerdo con los avances tecnológicos y con la información con la que se cuenta con relación a los transductores electroacústicos, se puede afirmar que una de las limitaciones de los transductores es que el patrón de radiación es dependiente con la frecuencia, de forma que, el ángulo de cobertura del haz se vuelve muy estrecho a frecuencias altas.

Es por este motivo que, en este proyecto, por una parte, se va a diseñar un arreglo lineal aplicando el concepto de CBT (Constant Beamwidth Transducer) propuesto a finales de los años 70 y aplicado por Keele a conjuntos de altavoces en los años 2000 [2]. Se entiende por arreglo lineal al conjunto de altavoces que acoplados entre sí operan como una única fuente. Así mismo, un sistema que se comporta como CBT es aquel que presenta un ancho de banda constante para todas las frecuencias tras aplicarle una serie de retardos y atenuaciones a cada transductor.

El arreglo lineal que se desea diseñar está pensado para aplicaciones de megafonía y de alarma, así que deberá resultar un sistema pequeño y de fácil manejo que sea capaz de radiar de manera constante las frecuencias que corresponden al rango de la voz humana, es decir, las frecuencias medias.

Lo realmente interesante de esta propuesta, es que, actualmente, no existen en el mercado sistemas de megafonía que cuenten con las características que ofrece una configuración CBT, por tanto, puede resultar un desafío el llegar a obtener los resultados esperados.

Además, es importante destacar que, para llegar al objetivo final, se parte de la base de diseñar y fabricar un pequeño altavoz unidad que servirá para obtener todos los

parámetros necesarios para poder caracterizar y modelar, posteriormente, el sistema acústico y así poder simular un arreglo lineal óptimo.

Finalmente, la parte de simulación se realizará utilizando el software EASE. Partiendo de las características obtenidas del altavoz unidad, y a través de este y por repetición, se formará el arreglo lineal al cual se le aplicarán todos los procesos necesarios para obtener un sistema final el cual emitirá como un CBT.

2. Objetivos

Los objetivos perseguidos en este proyecto son:

- Diseñar y construir el altavoz base que servirá de referencia para la configuración del arreglo lineal posterior.
- Obtener las características básicas del altavoz base necesarias, tales como: los parámetros de Thiele-Small, la respuesta en frecuencia y la directividad.
- Modelar mediante el uso de software adecuado el altavoz y realizar un estudio de radiación del altavoz base.
- Estudiar mediante simulación la radiación del arreglo lineal propuesto y comprobar si se han obtenido los resultados esperados.

3. Fundamentos teóricos

A continuación, se proceden a explicar los conceptos necesarios sobre altavoces, su funcionamiento y sus características; así como los parámetros principales presentes en cada transductor y cómo estos afectan a la caracterización de este.

3.1 Definición de altavoz

Se entiende por altavoz al transductor electroacústico que es capaz de convertir la energía eléctrica en energía acústica. Esto se suele realizar en dos etapas: una primera en la que se convierte la señal eléctrica en movimiento (transducción electro-mecánica) y la posterior conversión del movimiento en una onda acústica (transducción mecano-acústica).

Aunque existen diferentes tipos de altavoces, el más común y comercializado es el altavoz dinámico [3]. Además, dado que en este proyecto se ha escogido un altavoz dinámico (en concreto el Beyma 3FR30V2) para realizar todo lo correspondiente a la parte práctica, resulta más apropiado utilizar éste como referencia para explicar su funcionamiento y las partes que lo componen.

3.1.1 Partes de un altavoz

- El diafragma: El diafragma es el encargado de transformar el movimiento de las partes móviles en presión útil y guarda relación con las frecuencias que van a ser radiadas por el altavoz. Los materiales más usados para su fabricación son: papel, polipropileno, polimetilpenteno, aluminio y magnesio, fibra de carbono, etc.
- La bobina móvil: La bobina móvil formada por espiras de aluminio o cobre, dentro del campo magnético generado por el imán y el resto de las piezas polares, es la encargada de convertir la corriente eléctrica en fuerza ($F = Bli$), haciendo vibrar la membrana. Al vibrar la membrana, mueve el aire que tiene situado frente a ella y genera variaciones de presión u ondas acústicas.
- El entrehierro: Las funciones del entrehierro son: concentrar el flujo magnético generado por el imán y tener la capacidad de admitir una gran longitud de bobina. Es por esto por lo que el entrehierro debe ser estrecho y largo.
- El imán: El imán, normalmente, suele ser de ferrita y es el núcleo del motor del altavoz. Cuanto mayor sea el tamaño del imán, menor cantidad de energía eléctrica necesitará para producir igual volumen. Del mismo modo, cuanto más potente sea el imán, con mayor facilidad transformará el altavoz la energía eléctrica en acústica.
- La suspensión: La suspensión es la encargada de limitar el desplazamiento del diafragma para evitar que la bobina móvil se salga del entrehierro y al mismo tiempo, también se encarga de mantener la bobina y el entrehierro perfectamente centrados y garantiza un correcto movimiento de compresión y descompresión del aire.

3.1.2 Funcionamiento

El funcionamiento de un altavoz dinámico se puede describir como un campo magnético que se genera y varía de sentido (en función de la señal recibida) cuando a la bobina móvil se le aplica una señal eléctrica procedente de un amplificador o de cualquier otro equipo [13].

En la pieza denominada entrehierro, se coloca una bobina de hilo (generalmente de cobre) que está unida al diafragma. Esta bobina, genera una corriente eléctrica que, a su vez, genera un campo magnético que interactúa con el campo del imán, haciendo así vibrar la membrana. Así mismo, el cono vibra y genera perturbaciones en el aire en función de las variaciones de tensión de entrada.

Del mismo modo, cuanto mayor sea la frecuencia, menor será el desplazamiento del cono y viceversa.

3.1.3 Recinto acústico

Dado que un altavoz no radia únicamente hacia adelante, sino que también lo hace hacia atrás, una de las cosas más importantes a la hora de fabricar un sistema acústico es diseñar una caja acústica adecuada al altavoz, que sea capaz de bloquear la onda trasera para evitar la cancelación acústica que ésta provoca en el interior.

Esto es debido a que dentro de la caja se producen las diferentes reflexiones de las frecuencias más bajas correspondientes a grandes longitudes de onda. Estas reflexiones, además de provocar refuerzos que varían la respuesta en frecuencia del altavoz, también provocan atenuaciones e incluso interferencias destructivas.

Es por este motivo por el cual también resulta necesario acondicionar el recinto acústico por dentro haciendo uso de materiales absorbentes para evitar estas interferencias que pueden provocar que el sonido final no llegue a ser del todo nítido o que su respuesta en frecuencia no sea del todo plana [4].

Por lo general, la mayoría de los recintos acústicos están fabricados con madera de densidad media o con madera maciza natural [4], ya que la ventaja de este tipo de materiales es que ayudan a minimizar las vibraciones internas y, por tanto, no resulta necesario utilizar grandes cantidades de material absorbente.

Así pues, aparte de los materiales utilizados para la fabricación de la caja, también se debe tener en cuenta la configuración de esta, ya que esta decisión también afecta a la calidad del sistema. Hoy en día, existen dos tipos de recintos acústicos: de tipo cerrado y bass-reflex (aunque también existe la variante del radiador pasivo).

La caja de tipo cerrado, frente al bass-reflex, tiene la ventaja de que, en baja frecuencia, ofrece una respuesta más plana (aunque esto también depende del

diseño de la caja), con unas variaciones de fase menores y no se suelen producir retardos. Además, este tipo de cajas suelen ser más pequeñas.

El bass-reflex, por su parte, cuenta con un tubo (cavidad resonante) por el que sale el aire del interior y sirve para reforzar la respuesta a bajas frecuencias. La longitud del tubo no es aleatoria, sino que está relacionada con la longitud de onda de la frecuencia que se quiere reforzar. El inconveniente que presentan este tipo de cajas es que, por necesidad, tienen que ser mucho más grandes y pueden llegar a introducir ciertos retardos en algunas frecuencias, así como ruidos que se pueden llegar a producir al salir el aire a través de la cavidad resonante.

3.1.4 Tipos de altavoces

Además del altavoz dinámico que es en el que se ha tomado como referencia para explicar las partes y el funcionamiento de un altavoz, existen otros tipos de altavoces, destinados a otros usos más específicos, que siguen unos principios de funcionamiento similares. Algunos de ellos son:

- **Altavoz electroestático:** El altavoz electroestático, también denominado altavoz de condensador, está compuesto por un diafragma de poliéster que se encuentra situado entre dos placas polarizadas, una de ellas móvil y otra fija. Entre ambas placas se condensa la energía eléctrica que es suministrada por una fuente de tensión continua; cuando la energía almacenada entre las placas se incrementa, se produce una atracción o repulsión eléctrica entre ellas, provocando así que la placa móvil se mueva y genere una presión útil [13]. Este tipo de altavoces pueden reproducir frecuencias medias y altas, por tanto, cuentan con un rango frecuencial mayor que los piezoeléctricos.
- **Altavoz piezoeléctrico:** Este tipo de altavoz se basa en la propiedad que tienen algunos cristales de deformarse cuando se les aplica cierta tensión. Estas deformaciones se convierten en vibraciones que, a su vez, se transforman en ondas de sonido [13]. Dado que este altavoz presenta un rendimiento muy pequeño y que sus movimientos son microscópicos, se suelen emplear para las altas frecuencias y, profesionalmente, su uso se da en aplicaciones relacionadas con los ultrasonidos.
- **Altavoz de cinta:** El altavoz de cinta es el más similar al dinámico por lo que respecta a su funcionamiento. La diferencia más notable que presenta es que,

en lugar de contar con una bobina móvil, lo que genera la corriente y, por consiguiente, el campo magnético, es una cinta corrugada [14].

3.2 Definición de line array

El término line array hace referencia al sistema de altavoces que, al acoplarlos de manera lineal, el conjunto se comporta como una única fuente de sonido que opera con igual amplitud y fase [5]. La disposición de los altavoces, la distancia entre ellos y las frecuencias de corte, entre otros, son lo que posibilita que las ondas acústicas transmitidas tengan una mejor distribución y una mayor calidad que en el caso de los altavoces convencionales.

El line array se puede orientar en cualquier dirección, pero su principal uso se da en arreglos verticales, ya que presentan un patrón de salida muy estrecho y directivo; cosa que permite concentrar más fácilmente el sonido en el público. Además, la longitud que debe tener un line array también es un aspecto importante para tener en cuenta, puesto que, esta, siempre tiene que ser mayor que la longitud de onda de la frecuencia mínima que puede ser reproducida.

Los arreglos lineales difieren en diferentes aspectos de los altavoces convencionales. Mientras que los altavoces convencionales propagan las ondas de sonido de manera esférica siguiendo la ley inversa del cuadrado (la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del punto origen), es decir, se produce una atenuación del nivel de presión sonora de 6 dB cada vez que se dobla la distancia; el line array genera un frente de ondas cilíndrico que produce una atenuación del nivel de presión sonora de 3 dB cada vez que se dobla la distancia.

Sin embargo, existe una distancia a la fuente a partir de la cual, dependiendo de la frecuencia, el frente de ondas pasará de ser cilíndrico a ser esférico. Esta distancia guarda relación con la longitud del array y este a su vez, la guarda con la separación entre el campo cercano y el campo lejano. Por lo que, cuanto mayor sea el número de cajas con las que cuenta el array, más lejos se proyectará el campo cercano y, por tanto, más alejado se encontrará el límite en el cual nuestro frente de ondas se convertirá en esférico.

La fórmula que expresa la relación entre la longitud del array y el límite del campo cercano es la siguiente:

$$[1] D = \frac{H^2 \cdot f}{2C}$$

Siendo H la altura del array, f la frecuencia y C la velocidad del sonido.

No obstante, cabe destacar que, añadir más cajas al arreglo no implica un aumento de la intensidad de las altas frecuencias en el campo lejano, sino que estas permanecerán igual, ya que, al añadir más cajas, lo que sucede en realidad es que se concentra una mayor cantidad de energía de baja frecuencia en el campo cercano. Por esto, el único modo de aumentar las altas frecuencias en campo lejano es haciendo uso de la ecualización.

Además, al añadir más cajas también se observa una modificación de la respuesta en frecuencia total del sistema.

Por último, la directividad de los arrays se consigue mediante las interferencias constructivas y destructivas que se producen entre las cajas al radiar las ondas de sonido. Se entiende por interferencia constructiva aquella en la que la presión sonora aumenta en 6 dB, pero cuando se producen diferencias de trayectoria, se producen las cancelaciones o interferencias destructivas que provocan una atenuación en los niveles de presión sonora.

3.3 Definición concepto Constant Beamwidth Transducer (CBT)

El término CBT, también conocido como Constant Beamwidth Transducer nace a finales de los años 70 y principios de los 80 a raíz de una investigación militar sobre transductores submarinos [6, 7]. Esta investigación describe un transductor de superficie curvada con forma de casquete esférico, independiente de la frecuencia, que proporciona un comportamiento de ancho de haz y directividad extremadamente constante y, prácticamente, sin lóbulos secundarios.

Esta teoría se empezó a aplicar en los años 2000 a conjuntos de altavoces o arreglos lineales por Keele [2], que fue quien extendió el concepto de CBT a conjuntos basados en superficies curvas con forma de toroide y de arcos circulares. Del mismo modo, Keele también extendió el concepto a los arrays CBT de líneas rectas y paneles planos con el uso de retardos de señal [8].

A diferencia de los line array convencionales, un análisis más detallado [8] del conjunto de líneas circulares CBT revela que su cobertura vertical se estrecha cada vez más a medida que se avanza fuera del eje horizontal.

El estrechamiento de la cobertura vertical acompañado de la atenuación sonora adecuada sigue el coseno del ángulo horizontal fuera del eje. Esto significa que la

cobertura vertical del array se estrecha suavemente desde su valor diseñado en el eje y alcanza un mínimo en ángulos rectos horizontales al eje de escucha primario.

La ecuación que describe cuál es la atenuación que se le debe aplicar a cada transductor es la siguiente:

$$[2] \text{ } ATT_{n_CBT} = 20 \log_{10} \left(\cos \left(\frac{\alpha_n \cdot \pi}{\alpha_0 \cdot 2} \right) \right)$$

Siendo α_n el ángulo formado entre cada uno de los recintos y α_0 el ángulo total formado desde el primer recinto hasta el último.

Así pues, el campo sonoro de la esfera completa del array CBT revela un patrón característico de radiación sonora en forma de pétalo u ojo en 3D que es capaz de mantenerse uniforme con la frecuencia. Esto proporciona una directividad muy plana y un control del ancho del haz por encima de una determinada frecuencia que está establecida por el tamaño del array y la cobertura vertical diseñada.

3.4 Definición de términos generales

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se pasa ahora a definir y explicar los parámetros principales presentes en cada altavoz.

3.4.1 Impedancia eléctrica

Se entiende la impedancia eléctrica – expresada en Ohmios – como la oposición al paso de la corriente alterna. En los altavoces, dicha impedancia varía en función de la frecuencia. Normalmente, los fabricantes suelen especificar la impedancia nominal (Z_{nom}), R_e y, en ocasiones Z_{min} o la curva del módulo de impedancia.

Del mismo modo, los factores que determinan la impedancia de entrada de un altavoz son los siguientes [9]:

- La resistencia (en Ohmios) del hilo de la bobina que depende de: la longitud, la sección y el material del hilo.
- La reactancia inductiva de la bobina que depende de: la frecuencia aplicada y el coeficiente de autoinducción.
- Las corrientes inducidas en la bobina que se producen por los desplazamientos que realiza dentro del campo magnético que genera el imán permanente.

Para obtener una transferencia máxima de energía entre el amplificador y el altavoz, la impedancia de salida del amplificador tiene que ser lo más pequeña posible. En la práctica, entre 100 y 3000 veces inferior a Z_{nom} .

En la siguiente fórmula se refleja la relación que existe entre el valor de la impedancia y la potencia aplicada al altavoz:

$$[3] P = \frac{V^2}{Z}$$

Donde P es la potencia aplicada, V es la tensión en bornes del amplificador y Z es la impedancia.

De acuerdo con lo expuesto, cuanto menor sea la impedancia de entrada del altavoz, mayor será la potencia aplicada. No obstante, y como ya se ha mencionado, esto solo se puede dar siempre y cuando el amplificador sea capaz de llegar a esos niveles de corriente.

3.4.2 Respuesta en frecuencia

La curva de respuesta en frecuencia de un altavoz permite conocer la intensidad sonora proporcionada por el altavoz para las frecuencias que debe reproducir [9].

Cuanto más uniforme sea la respuesta en frecuencia de un equipo, mayor será su calidad a la hora de reproducir el sonido.

Sin embargo, la respuesta en frecuencia de un altavoz no es plana, sino que, en términos generales, radia mejor para cierto rango de frecuencia en función del uso para el que haya sido diseñado.

Los fabricantes suelen especificar esta gráfica en las especificaciones técnicas teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Si se trata de un altavoz de alta calidad, el margen de variación para el rango de frecuencias de 20 Hz a 20.000 Hz es de 6 dB.
- Si se trata de otro tipo de altavoz que no sea de alta calidad, se aceptan variaciones de 3 dB en el rango de frecuencias de 100 Hz a 15.000 Hz.

Además de esto, a la hora de realizar las mediciones se suele partir de los 80 Hz, ya que las frecuencias inferiores a esta proporcionan resultados inestables.

3.4.2.1 Medición de la respuesta en frecuencia

Existen diferentes formas de obtener la respuesta en frecuencia de un sistema, como puede ser a través de la respuesta al impulso, utilizando analizadores de espectro en tiempo real (RTA), sonómetros o programas especializados que cumplan la función.

Normalmente, cuando se pretende obtener la respuesta en frecuencia de un sistema, se hace uso de una cámara anecoica, dado que este tipo de sala está completamente aislada de cualquier ruido externo y en su interior cuenta con materiales (espumas, fibra de vidrio...) que absorben toda la energía y eliminan las reflexiones acústicas que puedan existir, emulando las características acústicas que se dan en campo libre.

Dentro de la cámara anecoica, aparte de medir la respuesta en frecuencia, también se puede medir la directividad, la potencia, la sensibilidad, la distorsión, etc.

En este caso, para medir la respuesta en frecuencia de un sistema dentro de la cámara anecoica, resulta necesario contar con un sonómetro de tipo 1 o, en su defecto, con un software y micrófono que cumplan con los requerimientos técnicos y puedan garantizar unos resultados fiables.

Para realizar las medidas, es necesario definir el rango de frecuencias a llevar a ensayo en función del tipo de altavoz (las mediciones deben cubrir al menos el margen útil de frecuencias [10]), ya que, si se pretende obtener la respuesta en frecuencia de un tweeter, no resulta realmente relevante conocer su comportamiento a una frecuencia de 125 Hz, puesto que no está preparado para ello.

Una vez definido el rango de frecuencias a medir, el sistema se debe colocar a una altura, aproximadamente de 1'5 metros y el micrófono de medición debe de estar ubicado a 1 metro de distancia de la fuente, totalmente centrado en el eje.

Además de esto, y siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 60268-5 [10], la señal que se le aplique al altavoz debe de ser una señal de tensión constante, ya sea sinusoidal o de ruido [10].

Finalmente, para corroborar la fiabilidad de los resultados obtenidos, se suelen llevar a cabo varias sesiones de medición – al menos 3 – para asegurarse de que no ha habido fallos en las medidas y que estas resulten válidas.

3.4.3 Potencia

La potencia, en términos generales, se relaciona con la potencia eléctrica que es capaz de admitir el altavoz. Esta se mide en vatios (W) y se define como la cantidad de energía que puede recibir el altavoz antes de que este distorsione o sufra daños. Dentro de la potencia se diferencia entre las siguientes:

3.4.3.1 Potencia nominal

La potencia nominal es la potencia máxima en régimen continuo que puede soportar el altavoz sin sufrir daños, es decir, si el altavoz trabaja por encima de dicha potencia, este sufrirá desperfectos, dado que no será capaz de disipar el calor producido por la corriente eléctrica que circula por la bobina.

La potencia eléctrica de entrada se obtiene a través de la siguiente fórmula:

$$[4] P = I^2 \cdot Z$$

Siendo P la potencia eléctrica, I la intensidad de corriente y Z la impedancia.

3.4.3.2 Potencia admisible

La potencia admisible (un pico de señal) corresponde al valor máximo instantáneo de potencia aplicado en un periodo corto de tiempo que puede soportar el altavoz antes de sufrir desperfectos [9].

3.4.3.3 Potencia RMS

La potencia RMS (potencia continua sinusoidal) es la potencia máxima con la que puede trabajar el altavoz (sobre la impedancia nominal) sin sufrir daños mecánicos o térmicos al ser excitado por una señal sinusoidal continua en una determinada banda de frecuencias [13]. Este valor, incluido en todas las especificaciones técnicas, es el más fiable para referirse a la potencia de un amplificador.

3.4.3.4 Potencia de ruido

La potencia de ruido es similar a la potencia RMS, pero en este caso, el altavoz es excitado por una señal ruidosa (ruido rosa o ruido blanco) en una determinada banda de frecuencias [14].

En la relación con la potencia de ruido o potencia acústica y la potencia eléctrica, se encuentra la eficiencia del altavoz, que se define como el rendimiento electroacústico. Esta relación se explica con la fórmula siguiente:

$$[5] \text{Eficiencia (\%)} = \frac{P_{\text{acústica}}}{P_{\text{eléctrica}}} \cdot 100$$

Como bien se indica, se mide en porcentaje y suele tener unos valores bajos en equipos de alta calidad, – entre un 2% y un 5% – es decir, un bajo porcentaje de energía es la que se convierte en sonido y el resto de esta se disipa.

3.4.4 Directividad y ángulo de cobertura

Cuando se habla de directividad, se refiere al modo en el que el sistema es capaz de radiar el sonido en el entorno.

La directividad, es también un parámetro característico de la fuente acústica que varía en función de la frecuencia. Resulta un parámetro muy importante para definir el patrón de radiación de un altavoz en concreto y cómo este radía el sonido en un entorno anecoico [15].

La directividad, no solo engloba el patrón de radiación en sí, sino que también se tienen en cuenta otros conceptos, – que resultan importantes – los cuales se explican a continuación.

3.4.4.1 *El origen acústico*

Se entiende por origen acústico al punto aparente en el espacio desde el cual se emite el sonido [15]. Este está determinado por el tiempo que pasa desde que la fuente emite el sonido hasta que llega al micrófono de medición.

El origen acústico y el origen físico no suelen coincidir y, además, el origen acústico también depende de la frecuencia.

Conocer el origen acústico resulta esencial para poder realizar el alineamiento de la señal correctamente.

3.4.4.2 *El centro acústico*

El centro acústico, a diferencia del origen acústico que está relacionado con la percepción de la ubicación de la fuente, se encuentra al proyectar sobre la fuente los planos de cobertura medidos (horizontal y vertical) y viendo en qué punto o puntos estos ángulos de radiación se cruzan con la fuente [15].

3.4.4.3 *El factor de directividad (Q) y el ángulo de cobertura*

Cuando los altavoces se acoplan entre sí para formar los arrays, como ya se ha comentado en el apartado 3.2, los patrones de radiación de cada fuente interfieren entre sí provocando que se reduzca a la mitad uno de los ángulos de cobertura, en este caso, el vertical. Este estrechamiento del ángulo de cobertura vertical puede, en ocasiones, resultar favorable y ayudar a reducir las reflexiones no deseadas en una sala demasiado reverberante al colocar el array de forma que, el haz se dirija primero a una superficie absorbente, en vez de a una reverberante.

Sin embargo, este estrechamiento del ángulo de cobertura no suele aumentar el factor de directividad. Es decir, si el ángulo es menor, toda la energía que se produce no pasa por el ángulo menor generando más potencia acústica, sino que esta se disipa en lóbulos secundarios que son generados por las mismas diferencias de fase que también contribuyen a reducir el ángulo de cobertura [15].

El factor de directividad viene definido por la siguiente fórmula, que guarda la relación entre la intensidad de la fuente en esa dirección y la intensidad de una fuente isotrópica (que radia con la misma intensidad para todas las direcciones) con la misma potencia:

$$[6] Q(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{ISO}}$$

Siendo $I(\theta, \varphi)$ la intensidad en plano horizontal y vertical (dirección θ y φ) respecto de su centro acústico e I_{ISO} la fuente isotrópica.

Por definición, el factor de directividad (Q) medio alrededor de cualquier altavoz o array, es siempre la unidad ($Q = 1$).

Este factor también se puede expresar en decibelios, denominándose índice de directividad:

$$[7] DI(\theta, \varphi) = 10 \log Q(\theta, \varphi)$$

El índice de directividad, expresado en decibelios (dB), expresa la intensidad de la fuente en términos de ganancia si los valores son positivos y en términos de pérdidas si estos resultan negativos. Así mismo, estos valores se representan en un diagrama polar.

3.4.4.4 Medición de la directividad

De acuerdo con lo mencionado en el apartado 3.4.2.1, las medidas de directividad también se realizan dentro de cámara anecoica y el equipamiento necesario resulta ser coincidente, a excepción de que, para realizar medidas de directividad de una forma correcta es preciso contar con equipos que faciliten la rotación de la caja o bien, que el micrófono se pueda mover con precisión hacia todos los ángulos deseados.

A la hora de medir la directividad resulta primordial conocer las simetrías existentes o no con las que puede contar el sistema, para así poder determinar todos los ángulos que se deben tener en cuenta y/o el recorrido esférico a realizar.

En este caso, la posición del micrófono respecto de la fuente debe ser tal que permita abarcar en su totalidad el tamaño de la esfera de radiación, la cual guarda relación con el tamaño del altavoz. Es por esto por lo que una mala ubicación del micrófono puede dar lugar a unos valores incorrectos de cobertura.

Por otra parte, las medidas se realizan en un rango de 100 Hz a 16 KHz y se debe procurar escoger una resolución lo suficientemente precisa para obtener unos resultados completos de toda la esfera.

Además, la directividad se debe medir en ambos planos de radiación: el plano vertical y el plano horizontal, para conocer el comportamiento del sistema en ambos casos y también poder determinar el centro acústico.

Así mismo, de acuerdo con la norma UNE-EN 60268-5 [10], a la hora de realizar las medidas se debe utilizar o bien una señal sinusoidal o bien una señal de ruido y se debe aplicar la misma al altavoz. La tensión de entrada se debe ajustar para cada frecuencia o banda de manera que la presión acústica en un punto específico del eje de referencia se mantenga constante [10].

Finalmente, a la hora de representar los resultados, estos se presentan en diagramas polares a frecuencias o bandas de frecuencia determinadas, preferiblemente de 1/3 de octava o una octava, cubriendo el margen de frecuencias nominal [10].

3.4.5 Parámetros de Thiele-Small

Entre 1961 y 1973 Neville Thiele y Richard H. Small desarrollaron una serie de parámetros electro-mecánico-acústicos que permitían conocer el comportamiento de los altavoces, facilitando así el diseño de sus correspondientes recintos.

Estos parámetros parten de la analogía existente entre estos tres sistemas y los componentes que los forman. Es por esto por lo que se puede decir que cualquier circuito resonante eléctrico, mecánico o acústico se comporta de manera equivalente [11].

Los parámetros de Thiele-Small permiten conocer la impedancia eléctrica, la respuesta en frecuencia, el nivel de presión sonora máximo, la excursión del cono, la sensibilidad, etc. Pero antes de explicar cómo se calculan y se obtienen los diferentes parámetros, resulta necesario definir la relación electro-mecánica-acústica existente.

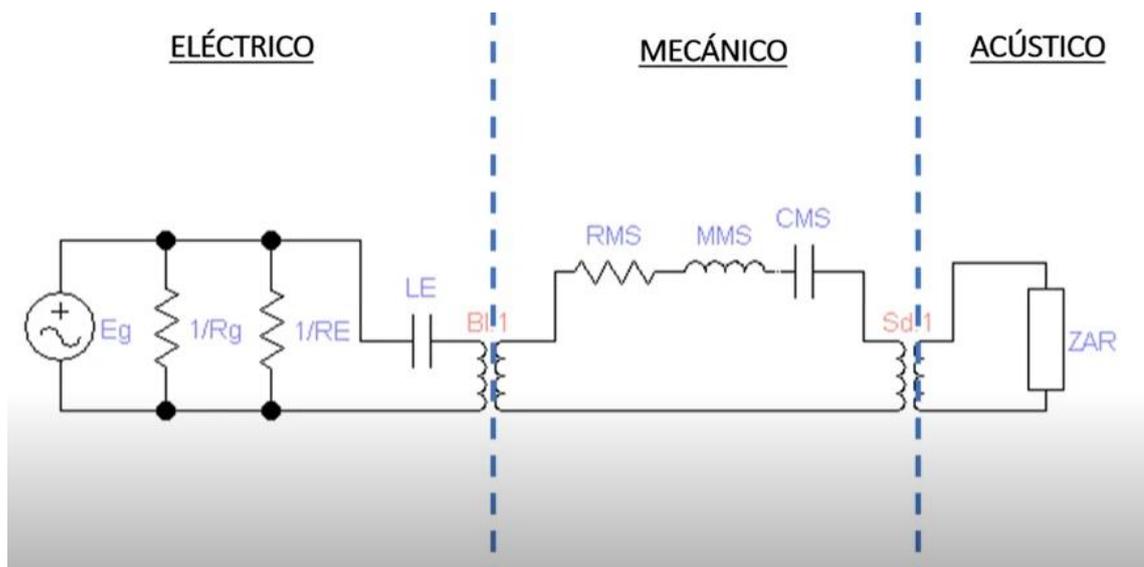


Figura 1. Circuito electro-mecánico-acústico

En la figura 1 se observa un circuito que representa todos los elementos de un altavoz. Este circuito se separa en tres partes siguiendo los principios de funcionamiento de un transductor: la parte eléctrica, la parte mecánica y la parte acústica.

En la parte eléctrica, como se puede ver en el esquema, se encuentran los siguientes componentes:

- El amplificador: Formado por E_g (fuente de alimentación) y $1/R_g$ (resistencia de salida).
- La resistencia en corriente continua: Señalizada como $1/RE$. Es la resistencia propia del altavoz. Es un parámetro facilitado por el fabricante, pero se puede medir fácilmente con un multímetro en bornes del altavoz, sin estar éste conectado a nada.
- La bobina: Señalizada como LE . Es la propia bobina del altavoz.
- El transformador: Referenciado como $Bl:1$ (factor de fuerza). Es el encargado de hacer la conversión eléctrico-mecánica.

Por lo que respecta a la parte mecánica, se tiene:

- RMS : Es la resistencia mecánica del altavoz medida en pantalla infinita, más concretamente, es la resistencia de fricción de la suspensión.
- MMS : Se conoce como la masa mecánica del altavoz. Está relacionado directamente con el peso del altavoz.

- CMS: Es la compliancia mecánica en pantalla infinita. Este parámetro va referido a las propias suspensiones del altavoz, ya sean externas o internas.
- El transformador: Referenciado como Sd:1. Es el encargado de realizar la conversión mecánico-acústica. Sd se puede definir como el área efectiva de la membrana en m².

Finalmente, en la parte acústica, se encuentra:

- ZAR: Conocida como la impedancia acústica de radiación. Al ser un valor muy pequeño, se considera despreciable a la hora de realizar los cálculos.

Dado que realizar los cálculos para este tipo de circuito eléctrico-mecánico-acústico resulta muy complicado, se realiza una simplificación de este para que resulte más fácil abordarlo, quedando de la siguiente manera:

CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

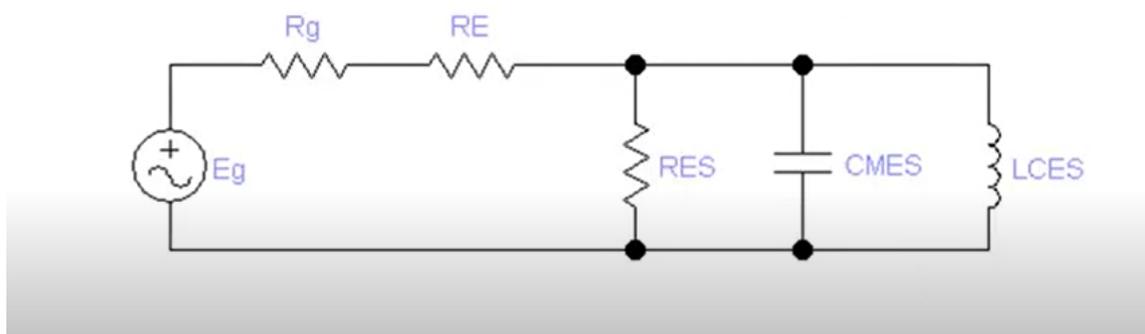


Figura 2. Circuito eléctrico equivalente

En este nuevo circuito eléctrico equivalente, desaparece la parte acústica, en la parte eléctrica se ha eliminado la bobina y el transformador (aunque Rg se considera despreciable, pues se trata de un valor muy pequeño) y la parte mecánica es la que ha sufrido cambios, apareciendo así RES, CMES y LCES, que sustituyen a RMS, CMES y MMS, respectivamente:

- RES: Es la resistencia eléctrica en pantalla infinita, definida como $R_{ES} = \frac{(Bl)^2}{R_{MS}}$.
- CMES: Es el condensador eléctrico en pantalla infinita, definida como $C_{MES} = \frac{M_{MS}}{(Bl)^2}$.
- LCES: Es la bobina eléctrica en pantalla infinita, definida como $L_{CES} = (Bl)^2 C_{MS}$.

Del mismo modo, partiendo del circuito eléctrico-mecánico-acústico original, también se puede obtener el circuito acústico equivalente que se observa a continuación (de nuevo, eliminando LE, ZAR y los transformadores):

CIRCUITO ACÚSTICO EQUIVALENTE

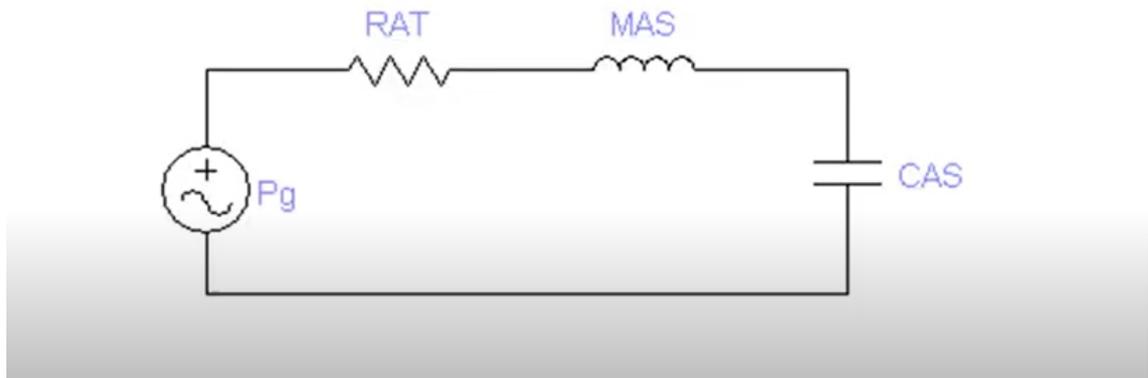


Figura 3. Circuito acústico equivalente

En este circuito, aparece lo siguiente:

- P_g : Producto de las dos transformaciones sufridas por E_g .
- RAT : La resistencia total acústica producto de la suma de todas las resistencias.
- MAS : Conocida como la masa acústica en pantalla infinita.
- CAS : Conocida como la compliancia acústica en pantalla infinita.

A raíz de este segundo circuito, se pueden obtener parámetros como, por ejemplo, la potencia acústica que va a ser capaz de radiar el altavoz. Con el uso de ambos: el circuito eléctrico equivalente y el circuito acústico equivalente; se obtienen todos los parámetros de Thiele-Small necesarios, siendo los más importantes:

- F_s : Frecuencia de resonancia del altavoz en pantalla infinita (Hz). Este parámetro indica la frecuencia mínima que el altavoz es capaz de reproducir.
- VAS : Elasticidad de la suspensión expresada en términos de un volumen de aire equivalente (litros).
- QMS : Factor de pérdidas mecánicas.
- QES : Factor de pérdidas eléctricas.
- QTS : Factor de pérdida total.

Así pues, teniendo en cuenta todo lo mencionado, los parámetros Thiele-Small, de manera manual, se calculan del siguiente modo [16]:

Para obtener la frecuencia de resonancia en aire libre f_s se tiene en cuenta la siguiente fórmula:

$$[8] f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}}$$

Siendo M_{MS} la masa mecánica de la membrana junto con la masa de aire que carga la membrana en kilogramos; y C_{MS} la elasticidad de la suspensión en m/N.

La frecuencia de resonancia también se puede obtener como:

$$[9] \omega_s = \frac{1}{\sqrt{M_{MS} \cdot C_{MS}}}$$

A partir de la frecuencia angular en (rad/s), se puede obtener el factor de pérdidas mecánico (Q_{ms}), como:

$$[10] Q_{ms} = \frac{\omega_s \cdot M_{MS}}{R_{MS}} = \frac{1}{\omega_s \cdot C_{MS} \cdot R_{MS}}$$

Siendo R_{MS} la resistencia mecánica junto con la resistencia a la radiación de la membrana en (Kg/s).

Así mismo, para calcular el factor de pérdidas eléctrico Q_{es} :

$$[11] Q_{es} = \frac{\omega_s \cdot M_{MS} \cdot RE}{(Bl)^2}$$

Siendo RE la resistencia en corriente continua de la bobina y Bl el factor de fuerza.

Una vez se tienen ambos factores, es posible calcular el factor de pérdidas total Q_{ts} , de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$[12] Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Finalmente, para obtener el VAS se necesita saber el área efectiva del diafragma (S_D), que se obtiene como:

$$[13] S_D = \pi \cdot a^2$$

De manera que:

$$[14] VAS = \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_D^2 \cdot C_{MS}$$

Siendo $\rho_0 = 1'18kg/m^3$ y c la velocidad del sonido en el aire en (m/s).

3.5 Apuntamiento electrónico

El apuntamiento electrónico, a diferencia del mecánico (en el que se angula cada uno de los elementos de la columna de manera manual), consiste en modificar el ángulo de cada elemento del arreglo lineal aplicando una serie de retardos mediante el uso de un algoritmo sencillo [12]. Este proceso que sufre la señal ofrece una mayor precisión y un mayor manejo de la directividad comparado con un sistema que cuenta con apuntamiento mecánico.

Así mismo, mediante el uso del apuntamiento electrónico se consigue controlar y emitir en la misma dirección que el lóbulo principal la energía sonora asociada a la reflexión posterior. Este control sobre las reflexiones posteriores contribuye a mejorar la inteligibilidad; del mismo modo que, gracias a este procesado, también se consiguen minimizar los lóbulos secundarios, disminuyendo así la contribución del campo reverberante.

De este modo, el retardo temporal virtual que se desee aplicar a cada elemento de la columna se define a través de la siguiente fórmula:

$$[15] \delta_n = \frac{\sin(\alpha) b_n}{c}$$

Donde b_n es la distancia entre los respectivos centros de la fuente 0 y la fuente n, α es el ángulo de apuntamiento deseado y c es la velocidad del sonido (m/s).

Finalmente, al igual que sucede con el apuntamiento mecánico, las variaciones de temperatura también juegan un papel importante en el apuntamiento electrónico, dado que, dichas variaciones afectan directamente a la velocidad del sonido y, por consiguiente y de acuerdo con lo mostrado en [15], repercute en el retardo determinado para cada fuente, provocando cierta desviación en el ángulo deseado. No obstante, en este aspecto, el apuntamiento electrónico ofrece la ventaja de poder corregir estas desviaciones tomando valores aproximados de temperatura o incluyendo procedimientos de autoajuste en el sistema; soluciones que en el caso del apuntamiento mecánico no se pueden contemplar.

4. Desarrollo

Aplicando los conceptos teóricos explicados en el apartado 3, se ha procedido a obtener los parámetros de Thiele-Small del altavoz Beyma 3FR30V2 para poder realizar el diseño del recinto acústico adecuado y así llevarlo a fabricación. Este pequeño sistema fabricado, el cual cuenta con 2 transductores, será el altavoz base que se utilizará como referencia para la posterior simulación de un arreglo lineal utilizando el software EASE.

El arreglo lineal estará formado por numerosos altavoces base introducidos por repetición. Dicho arreglo es el que será sometido a diferentes procesos de señal para comprobar el funcionamiento de este sistema final con una configuración con apuntamiento electrónico determinado y con una configuración con un comportamiento CBT (ambas configuraciones por separado).

Los pasos seguidos y los resultados obtenidos se detallan uno a uno en los siguientes apartados.

4.1 Obtención de los parámetros de Thiele-Small

Como ya se ha comentado en el apartado 3.4.5, los parámetros de Thiele-Small son un conjunto de valores que caracterizan el comportamiento eléctrico, mecánico y acústico de un altavoz. Mediante la obtención de estos parámetros es posible conocer, de manera aproximada, el funcionamiento de un altavoz en un determinado recinto acústico, así como su respuesta en frecuencia, la impedancia eléctrica o el nivel de presión sonora máximo, entre otros.

En este caso, para obtener los parámetros T/S del altavoz, se ha hecho uso del software LIMP. Para este software es necesario conectar una tarjeta de sonido a un ordenador y calibrar correctamente los canales hasta conseguir que se igualen sus salidas. En la figura inferior se puede observar el esquema de conexionado.

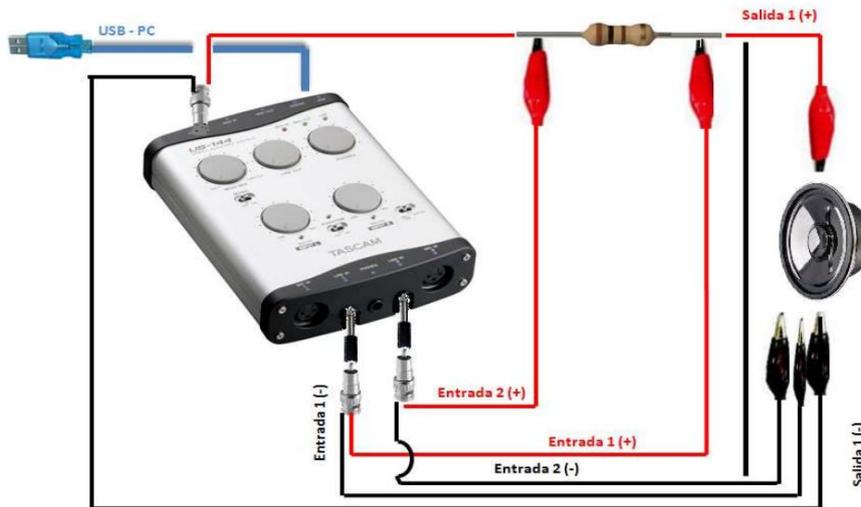


Figura 4. Esquema de conexionado

Una vez conectado y calibrado correctamente, se puede generar una forma de onda sinusoidal para obtener la curva de impedancia del altavoz sin masa y con masa añadida (16,3 gr). En la siguiente imagen se puede observar en verde la curva de impedancia con masa añadida y en amarillo la curva de impedancia sin masa.

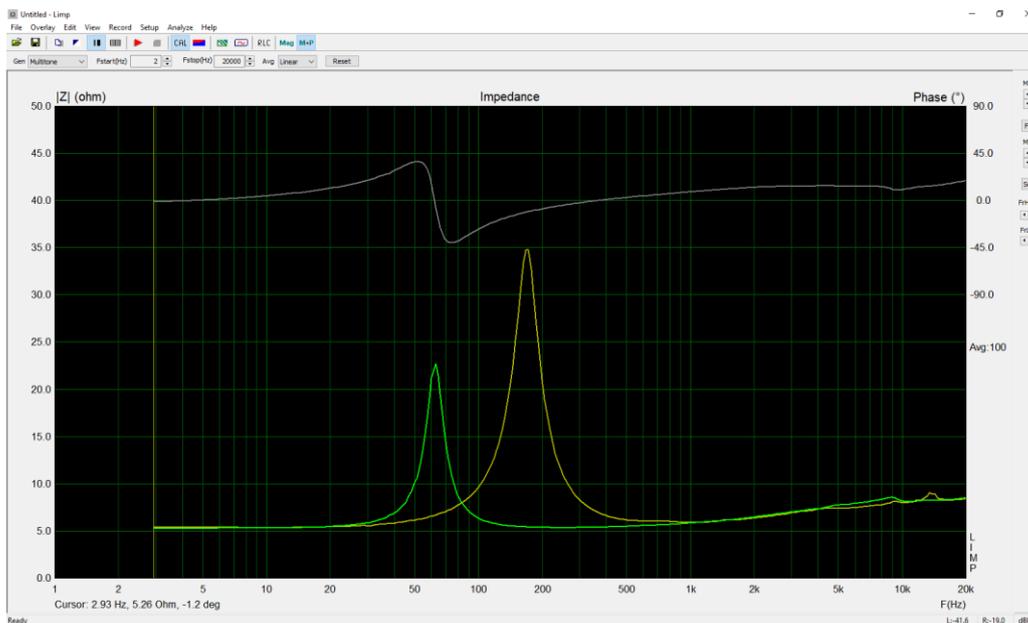


Figura 5. Curva de impedancia con masa (verde) y sin masa (amarillo)

Se puede ver cómo al añadirle la masa, la frecuencia de resonancia ha disminuido hasta los 62 Hz, mientras que sin masa dicha frecuencia es de 163 Hz. Este cambio en la curva de impedancia es debido a la resistencia que ofrece el grupo móvil al añadir la masa.

Después de esto, los parámetros de T/S estimados utilizando el software LIMP – de acuerdo con la resistencia en ohmios del altavoz y el diámetro de su membrana (6 cm) – son los siguientes:

| Parámetros T/S | |
|-----------------------|----------------------------|
| Fs = 163,15 Hz | Mms = 1,93 gr |
| Re = 5,48 ohm [dc] | Rms = 0,54 kg/s |
| Le = 24,60 uH | Cms = 0,49 mm/N |
| L2 = 117,12 uH | Vas = 0,55 liters |
| R2 = 2,41 ohm | Sd = 28,27 cm ² |
| Qt = 0,61 | ETA = 0,31% |
| Qes = 0,74 | Lp = 88,72 dB |
| Qms = 3,71 | |

Tabla 1. Parámetros T/S para un altavoz

Es importante mencionar que, en el recinto acústico a diseñar, se instalarán 2 altavoces. El motivo por el cual se ha decidido instalar 2 altavoces en una única caja es para no contar con una fuente coaxial y poder apreciar correctamente las diferencias entre una fuente discreta (altavoz colocado en plano vertical) y un dipolo (altavoz colocado en plano horizontal).

Es por esto por lo que, tras la obtención de los parámetros de T/S para un único altavoz, se ha realizado una simulación para conocer las características de la caja para dos altavoces.

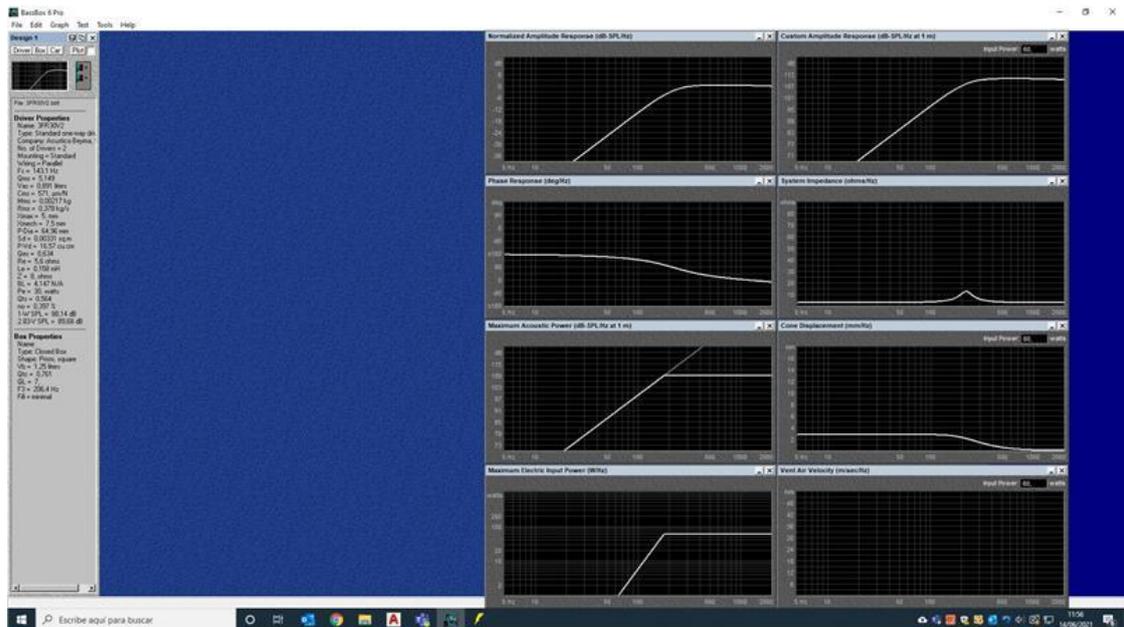


Figura 6. Simulación con los parámetros T/S para 2 altavoces

Tras estas simulaciones donde también se puede apreciar la impedancia del sistema, la respuesta en fase, el desplazamiento del cono o el nivel de presión sonora máximo; el diseño del recinto acústico escogido (con un volumen neto de 1,25 litros según lo obtenido) ha sido el siguiente:

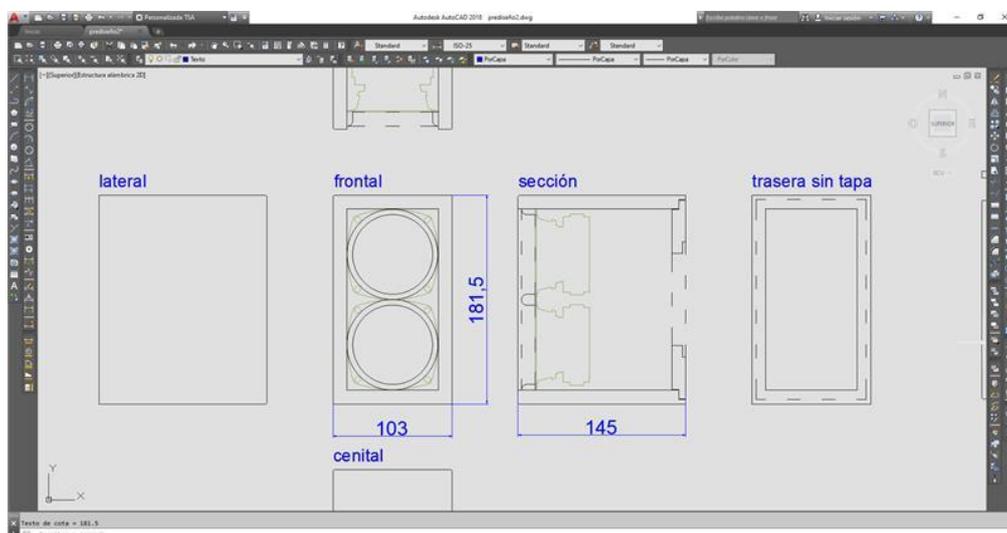


Figura 7. Diseño del recinto acústico



Figura 8. Recinto acústico



Figura 9. Recinto acústico

Cabe destacar que en el interior de la caja se ha colocado material absorbente, en concreto, una lámina de espuma corrugada de 15mm de espesor en la parte trasera del recinto, con la intención de evitar posibles resonancias internas que pudiesen afectar a la membrana en frecuencias medias.

4.2 Obtención de la directividad

La directividad, de acuerdo con lo mencionado en el apartado 3.4.4, expresa el nivel de presión sonora de un altavoz en función del ángulo de radiación.

Para realizar medidas completas de directividad, es necesario medir el nivel de presión sonora (SPL) alrededor de una esfera en cuyo centro se encuentra el altavoz (apartado 3.4.4.4). El diámetro de dicha esfera deberá ser grande comparado con las dimensiones del altavoz. Las medidas se realizarán para todas las frecuencias y de 0° a 180° , con una resolución de paso de 5° , y considerando las simetrías existentes, tanto en horizontal como vertical.

En este caso, durante la realización de las medidas en la cámara anecoica del Campus de Gandía (Universidad Politécnica de Valencia), se hizo uso del sistema CLIO, el cual genera un fichero “.txt” de todas las frecuencias (equiespaciadas logarítmicamente) para cada posición.

Paralelamente, también se obtuvieron ficheros de respuestas temporales al impulso para cada una de las posiciones.

Dentro de la cámara, se colocó un micrófono a 1 metro de distancia de la fuente y se utilizó una mesa giratoria, facilitando la rotación para conseguir los diferentes ángulos.

Se realizaron dos sesiones de medición: la primera para el plano vertical y la segunda para el plano horizontal.

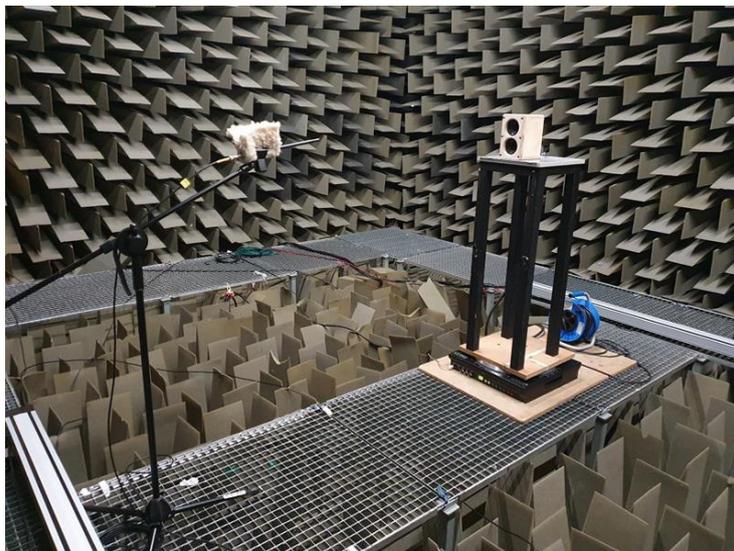


Figura 10. Medidas directividad plano vertical

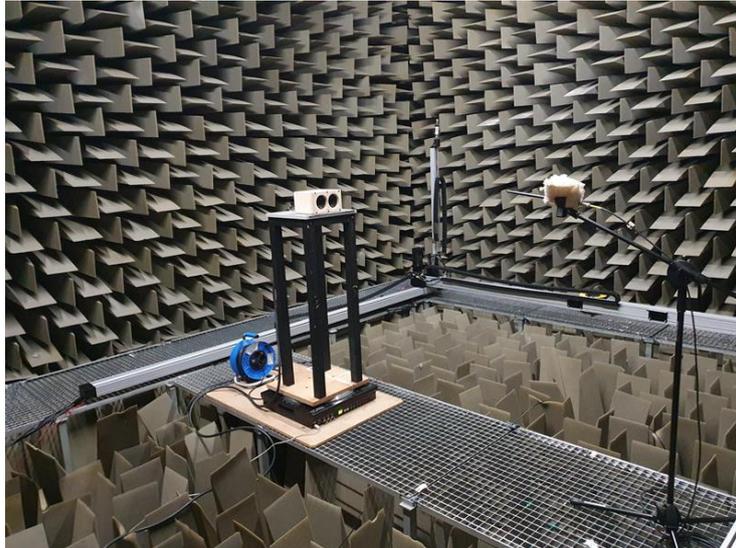


Figura 11. Medidas directividad plano horizontal

Una vez realizadas todas las medidas y obtenidos todos los ficheros necesarios, se ha procedido a realizar un programa con el uso del software Matlab para procesar todos los datos y poder representar la directividad en ambos planos. Las líneas de código se muestran a continuación:

```
function directividad(texto,angulomax,inc,octava_R)
%Esta función calcula el diagrama polar de directividad de un altavoz, a
%partir de las mediciones realizadas en cámara anecoica, y teniendo en
%cuenta que dibuja el digrama polar por simetria izquierda-derecha.
%
%texto: nombre de los archivos .txt con los datos de la medida
%angulo max: es el ángulo hasta el que se han realizado medidas (normalmente 90 o 180)
%inc: incremento en grados del angulo de emisión
%octava_r:Octava de representación.
```

Figura 12. Explicación función directividad

Teniendo en cuenta que todos los ficheros “.txt” para las posiciones horizontal y vertical se encuentran dentro de una misma carpeta, para llamar a la función *directividad* creada, se necesita especificar el nombre del fichero, los grados a representar, la resolución de paso y la banda de octava.

Un ejemplo de llamada desde el *main* sería el siguiente:

```
directividad('HOR_1 ',180,5,5);
```

Figura 13. Ejemplo de llamada en el main

De manera interna, la función *directividad* funciona del siguiente modo:

Primeramente, se inicializan todas las variables necesarias para el correcto funcionamiento del código

```

%% inicialización de variables
cont =1;
vectorD=cell(angulomax/inc+1,1);
dBSPL_por_octava=cell(angulomax/inc+1,1);
dBSPL=zeros(angulomax/inc+1,1);
cont2=angulomax/inc+1;

```

Figura 14. Inicialización de variables

Una vez inicializadas todas las variables, se procede a cargar y a promediar todas las medidas de cada fichero. Este paso es necesario dado que, el archivo “.txt” que genera CLIO, muestra las frecuencias por puntos equiespaciados logarítmicamente. En este caso, se necesita realizar un promedio de cada punto para poder representar la directividad por bandas de octava.

```

%% cargado y promedio de las medidas
for i=0:inc*100:angulomax*100
    string=[texto num2str(i) '.txt'];S
    vectorD{cont}=load(string);

    dBSPL_por_octava{cont}=promedio_octavas(vectorD{cont}(1:256,2));
    dBSPL(cont)=dBSPL_por_octava{cont}(octava_R);%octava
    dBSPL(cont)=10^(dBSPL(cont)/20);

    cont=cont+1;
end

dBSPLinv=zeros((angulomax/inc),1);

```

Figura 15. Cargado y promediado de las medidas

A continuación, considerando las simetrías existentes y teniendo en cuenta que el diagrama polar se dibuja por simetría izquierda-derecha, la representación polar se realiza de la siguiente manera:

```

%% simetría izquierda-derecha
for n=1:angulomax/inc+1
    dBSPLinv(n)=dBSPL(cont2);
    cont2=cont2-1;
end

%% representación del diagrama polar de directividad
vector_dBSPL=zeros(2*(angulomax/inc)+1,1);
vector_dBSPL=[dBSPL;dBSPLinv];

tetha=linspace(0,2*pi,2*(angulomax/inc)+2);

polar2(tetha',20*log10(vector_dBSPL/max(dBSPL)),[-36 0])
end

```

Figura 16. Consideración de la simetría y representación polar

Las bandas de frecuencia consideradas son las siguientes:

```
% frecuencia 1->16Hz  frecuencia 2->31.5Hz  frecuencia 3->63Hz
% frecuencia 4->125Hz frecuencia 5->250Hz  frecuencia 6->500Hz
% frecuencia 7->1KHz  frecuencia 8->2KHz   frecuencia 9->4KHz
% frecuencia 10->8KHz
```

Figura 17. Bandas de frecuencia consideradas

Así mismo, dado que el sistema de altavoces llevado a ensayo está pensado para usos en los que predominan las frecuencias de la voz humana como pueden ser: instalaciones de control de alarmas por voz y sistemas de evacuación; las bandas de frecuencia representadas son: 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz y 8 KHz.

Finalmente, la llamada general en el *main* para representar las bandas de frecuencia mencionadas en el plano vertical y horizontal sería la siguiente:

```
%-----
%VERTICAL
%-----

figure
directividad('VER_1 ',180,5,5);
hold on
directividad('VER_1 ',180,5,6);
directividad('VER_1 ',180,5,7);
directividad('VER_1 ',180,5,8);
directividad('VER_1 ',180,5,9);
directividad('VER_1 ',180,5,10);
title('VERTICAL')
legend ('0.25 kHz','0.5 kHz','1 kHz','2 kHz','4 kHz','8 kHz')
hold off
```

Figura 18. Llamada en el main para representación vertical

```

%-----
%HORIZONTAL
%-----

directividad('HOR_1 ',180,5,5);
hold on
directividad('HOR_1 ',180,5,6);
directividad('HOR_1 ',180,5,7);
directividad('HOR_1 ',180,5,8);S
directividad('HOR_1 ',180,5,9);
directividad('HOR_1 ',180,5,10);
title('HORIZONTAL')
legend ('0.25 kHz','0.5 kHz','1 kHz','2 kHz','4 kHz','8 kHz')
hold off

```

Figura 19. Llamada en el main para representación horizontal

De este modo, tras analizar todos los datos, el diagrama polar obtenido en el plano vertical es el siguiente:

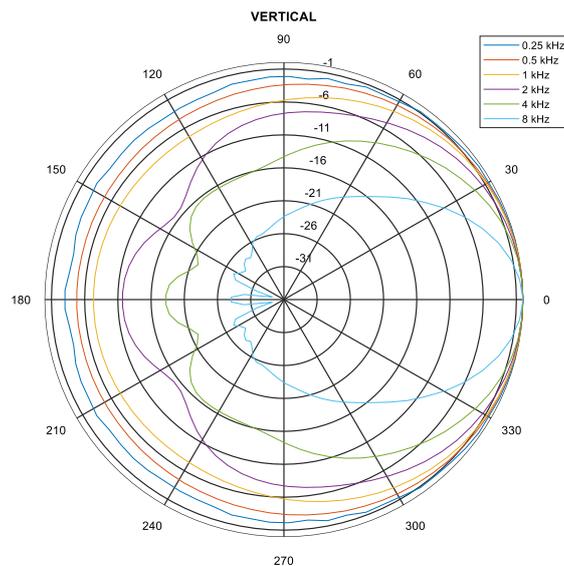


Figura 20. Diagrama polar en plano vertical

Se puede ver cómo a bajas frecuencias, el altavoz radia de manera omnidireccional, hasta llegar a los 2 KHz donde se empieza a estrechar el haz y pasa a tener un comportamiento más directivo. Esto resulta lógico al tratarse de frecuencias altas las cuales tienen una longitud de onda más pequeña.

Por otra parte, en el plano horizontal se observa lo siguiente:

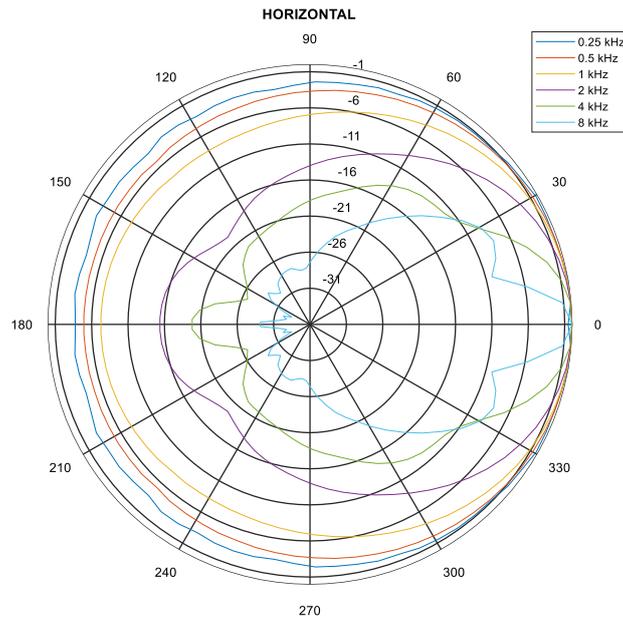


Figura 21. Diagrama polar en plano horizontal

En este caso, el ángulo de cobertura para cada banda de frecuencias resulta un poco menor que en el plano vertical y, además, se puede observar cómo aparecen lóbulos secundarios para la banda de frecuencias de 4 KHz y 8 KHz. Esto es debido a las interferencias destructivas (cancelaciones) que se producen entre los frentes de ondas al estar ambos altavoces ubicados de manera horizontal y muy próximos entre sí.

4.3 Obtención de la respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia de un altavoz es un parámetro que indica la variación de la salida a un estímulo de entrada con respecto a la frecuencia.

Dado que la respuesta en frecuencia se mide en el eje, se han utilizado las medidas obtenidas con CLIO en la posición de 0°, coincidente tanto para el plano vertical como para el plano horizontal.

Representando en Excel estos datos y contemplando el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 KHz, se puede observar en la siguiente gráfica la respuesta en frecuencia del sistema.



Figura 22. Resposta en frecuencia en plano horizontal

Se puede ver cómo aparecen ciertas irregularidades en frecuencias inferiores a 100 Hz, dado que éstas son frecuencias que el sistema no puede reproducir correctamente. A partir de los 315 Hz, el altavoz presenta un comportamiento bastante plano hasta los 6 KHz, frecuencia a partir de la cual se observan algunos picos.

Por otra parte, el aumento abrupto presentado por encima de la frecuencia de 1 KHz resulta ser un fenómeno conocido como *baffle step*. Dado que el altavoz radía de manera omnidireccional, existe una frecuencia a partir de la cual – en este caso 1400 Hz – la caja se comporta como una pantalla y radía solo hacia adelante, provocando el refuerzo observado de +6 dB.

Finalmente, tomando como referencia 1 KHz (90 dB +/- 6 dB), el rango útil de respuesta en frecuencia se puede considerar desde 220 Hz hasta 15 KHz.

4.4 Modelado del sistema base

Una vez obtenidos los resultados anteriores, con los ficheros de respuesta al impulso también generados en las medidas realizadas con CLIO, resulta necesario utilizar el software EASE SpeakerLab (o similares) para realizar el modelado del sistema.

EASE SpeakerLab es un programa utilizado para crear, editar y visualizar modelos de altavoces (presentados como archivos GLL) facilitando los datos de directividad y respuesta en frecuencia del altavoz en cuestión. Así mismo, también se permite aplicar filtros de cruce, retardos y ecualizaciones a cada recinto por separado para ofrecer un cálculo preciso de la respuesta total del sistema.

Dicho esto, lo primero que se debe hacer es importar todos los ficheros de respuesta al impulso necesarios, de acuerdo con el tipo de medidas previas que se hayan realizado.

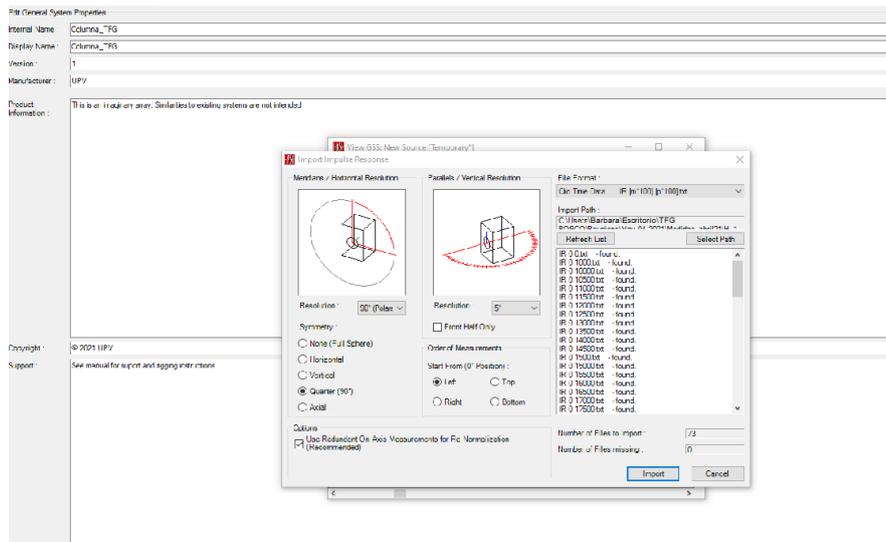


Figura 23. Importación de datos en EASE

En este caso, como se dispone de dos altavoces exactamente iguales y contemplando las simetrías existentes, como se ha comentado en el apartado 4.2, en cámara anecoica se realizaron 37 medidas (180° con una resolución de 5°) para plano horizontal y vertical. Por tanto, en EASE se deberá indicar la simetría correspondiente, el tipo de medida y la resolución, tal y como se muestra en la figura superior.

EASE indica de forma automática cuántos ficheros necesita que sean facilitados para simular la fuente, los cuales corresponden con la cantidad de ficheros generados por CLIO durante la realización de las medidas. Una vez importados todos los ficheros, el software genera la fuente correspondiente.

A modo de comprobación, se generan los diagramas polares a las frecuencias de 1 KHz y 4 KHz (como ejemplo) para confirmar que se obtiene la misma representación que la vista en las figuras 20 y 21.

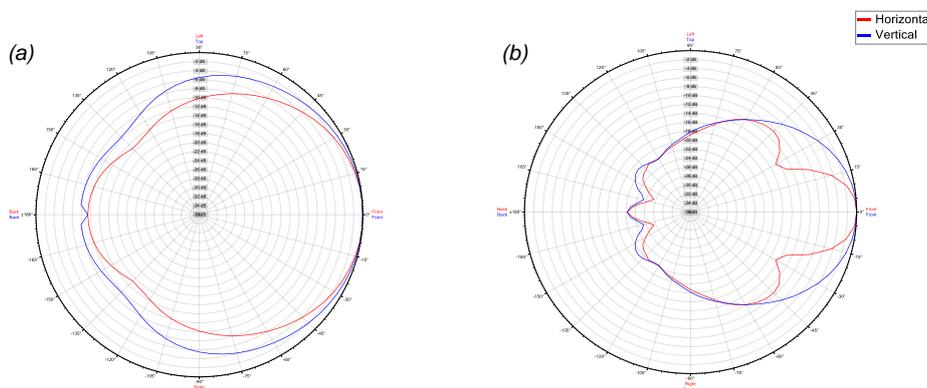


Figura 24. (a) Diagrama polar 1 KHz. (b) Diagrama polar 4 KHz.

Así mismo, se puede obtener el diagrama de directividad de la fuente en el plano vertical y horizontal.

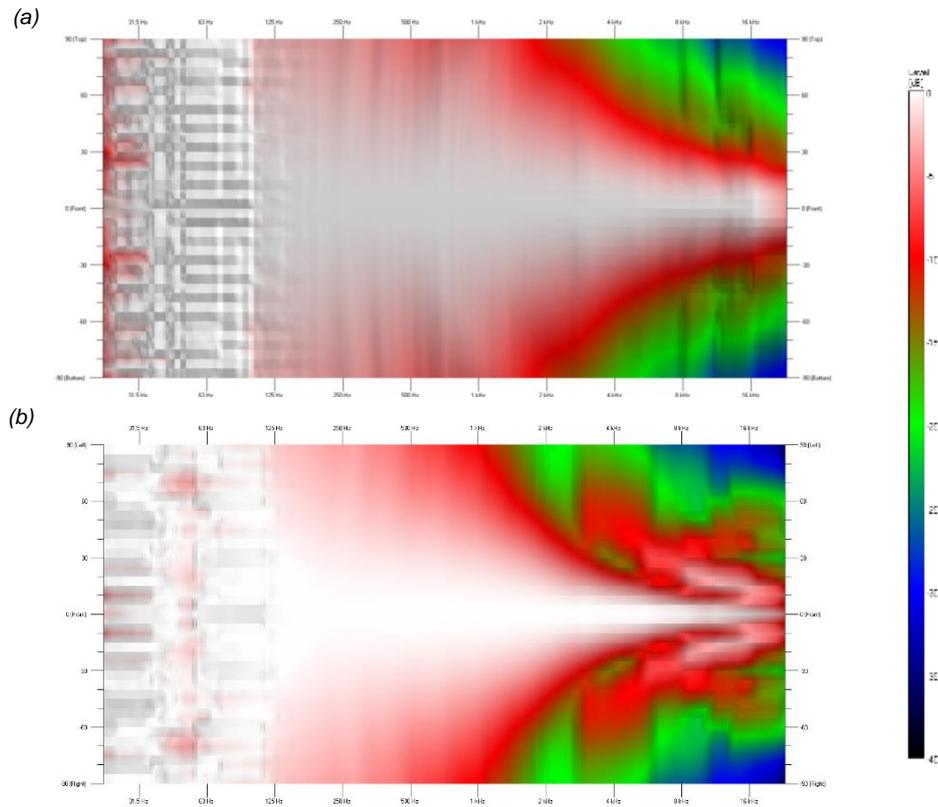


Figura 25. (a) Diagrama de directividad vertical. (b) Diagrama de directividad horizontal

En ambos diagramas se representan las frecuencias en escala logarítmica en el eje X, y los grados de 90° a -90° en el eje Y. En el diagrama de directividad vertical, el cual se presenta sin lóbulos secundarios, se puede observar cómo se estrecha el haz a medida que aumenta la frecuencia; mientras que, en el diagrama de directividad horizontal, además de apreciarse un estrechamiento más pronunciado, también aparecen lóbulos secundarios en las frecuencias más agudas. Esto último, como ya se ha comentado anteriormente en el apartado 3.2 y 3.4.4.3, es debido a la interferencia del frente de ondas existente en el plano horizontal por la proximidad de ambos altavoces y su patrón de radiación.

De este modo, con los datos mostrados, se puede afirmar que ya se disponen de las características principales de la fuente original necesarias para poder realizar el correspondiente estudio de radiación.

4.5 Estudio de radiación del arreglo lineal

Para realizar el estudio de radiación, se contempla un sistema compuesto por 24 cajas colocadas en horizontal. El sistema no presenta ningún tipo de angulación, sino que está dispuesto como una columna volada totalmente recta.

Se han decidido escoger un total de 24 cajas para así tener una longitud de columna lo suficientemente representativa y poder apreciar con propiedad la respuesta del sistema en baja frecuencia.

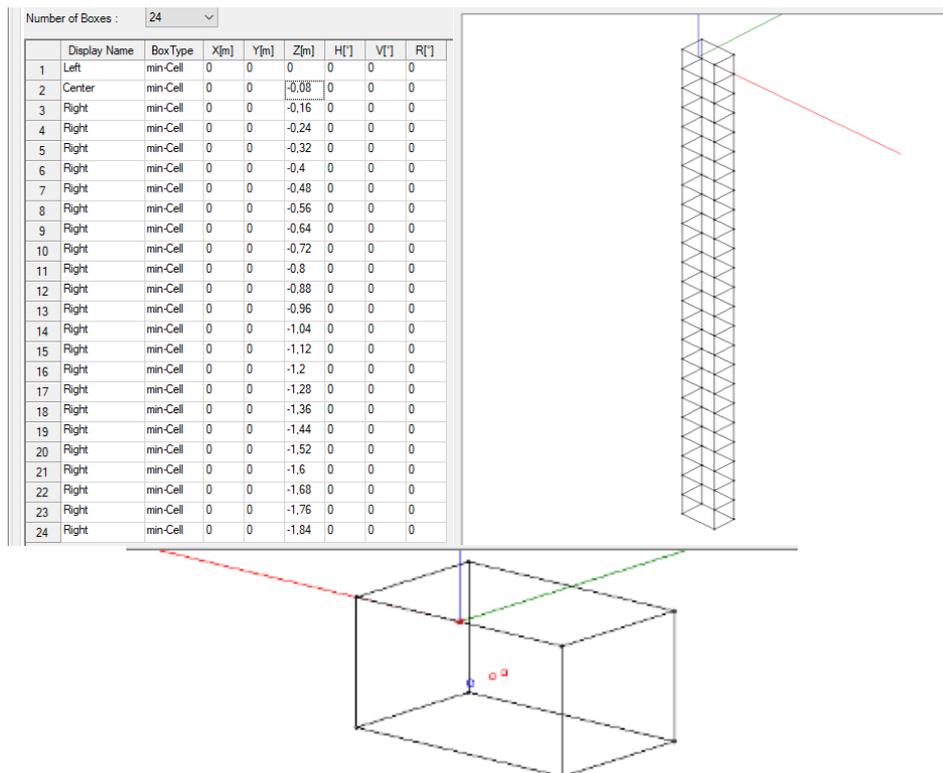


Figura 26. Configuración de la columna en EASE y punto origen

En la figura 26 se puede ver la configuración del sistema que presenta una altura total de 1.84 metros, siendo min-Cell la fuente original importada.

Se observa, también, en la columna $Z(m)$ la distancia a la que está colocada cada caja desde el punto origen, siendo esta de 0.08 metros que corresponde a la distancia entre centros.

Con esta configuración y disposición de las cajas que conforman el sistema, se procede a continuación a realizar el correspondiente estudio de radiación.

4.5.1 Apuntamiento electrónico

El primer estudio que se ha realizado corresponde al caso del apuntamiento electrónico. El apuntamiento electrónico, de acuerdo con lo expuesto en el apartado 3.5, resulta de gran utilidad en los espacios cerrados muy reverberantes, ya que se puede concentrar el haz en una zona muy concreta en relación con la angulación virtual a base de retardos que se le haya dado al sistema. Además de esto, ofrece el beneficio de dirigir el haz trasero hacia el frente creando interferencias constructivas.

Dicho esto, y de acuerdo con lo reflejado en la fórmula [15], se ha generado un cálculo en Excel para obtener el retardo que se le debe aplicar a cada caja para conseguir el ángulo de apuntamiento deseado, en este caso, 15°.

| APUNTAMIENTO | | b [m] | c [m/s] | alpha [deg] | pos (Z axis) |
|--------------|--------------|-------|---------|-------------|--------------|
| n | retardo [ms] | 0,08 | 343 | 15 | |
| 0 | 0,000 | | | | 0 |
| 1 | 0,060 | | | | -0,08 |
| 2 | 0,121 | | | | -0,16 |
| 3 | 0,181 | | | | -0,24 |
| 4 | 0,241 | | | | -0,32 |
| 5 | 0,302 | | | | -0,4 |
| 6 | 0,362 | | | | -0,48 |
| 7 | 0,423 | | | | -0,56 |
| 8 | 0,483 | | | | -0,64 |
| 9 | 0,543 | | | | -0,72 |
| 10 | 0,604 | | | | -0,8 |
| 11 | 0,664 | | | | -0,88 |
| 12 | 0,724 | | | | -0,96 |
| 13 | 0,785 | | | | -1,04 |
| 14 | 0,845 | | | | -1,12 |
| 15 | 0,905 | | | | -1,2 |
| 16 | 0,966 | | | | -1,28 |
| 17 | 1,026 | | | | -1,36 |
| 18 | 1,087 | | | | -1,44 |
| 19 | 1,147 | | | | -1,52 |
| 20 | 1,207 | | | | -1,6 |
| 21 | 1,268 | | | | -1,68 |
| 22 | 1,328 | | | | -1,76 |
| 23 | 1,388 | | | | -1,84 |

Figura 27. Valores de apuntamiento electrónico para 15°

Siendo b la distancia entre centros, c la velocidad del sonido y α el ángulo de apuntamiento. Las posiciones que se observan en la columna *pos (Z axis)* son las introducidas anteriormente en EASE en la columna $Z(m)$.

Aplicando la fórmula [15] en la columna Apuntamiento, tenemos el retardo en milisegundos que se le debe introducir a cada caja del sistema en EASE para conseguir los resultados deseados.

Tras introducir cada retardo individualmente en el software, EASE muestra los siguientes resultados para las frecuencias de 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz y 4 KHz. El motivo de que se hayan considerado estas bandas de frecuencia es debido a que, este sistema, está pensado para reproducción de voz humana (sistemas de alarma, aeropuertos, estaciones de tren, etc.), por tanto, el resto de las frecuencias no aplican para este caso.

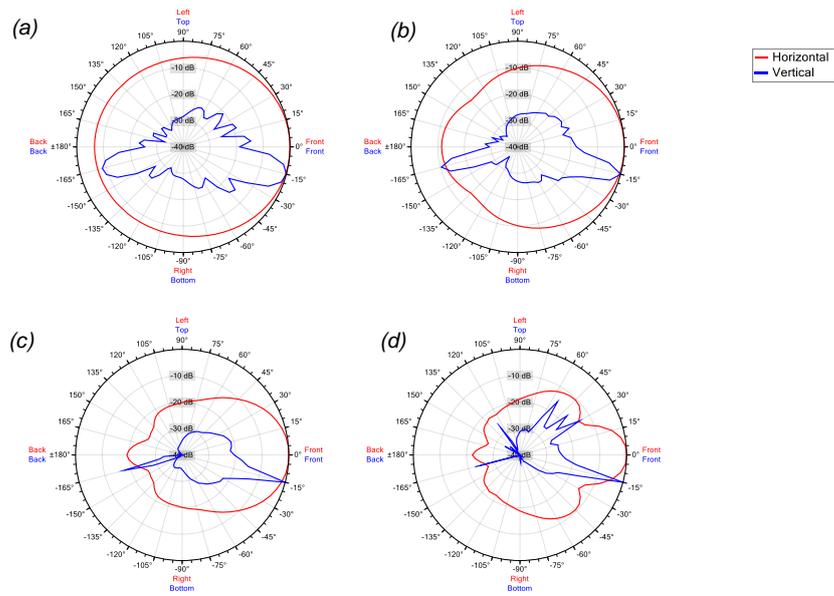


Figura 28. (a) Apuntamiento 15° 500 Hz. (b) Apuntamiento 15° 1 KHz.
(c) Apuntamiento 15° 2 KHz. (d) Apuntamiento 15° 4 KHz

En los diagramas polares presentados se comprueba ese apuntamiento virtual del haz con una inclinación de 15° para todas las frecuencias y cómo este se va estrechando a medida que aumenta la frecuencia, al mismo tiempo que disminuye la radiación trasera y se mantiene estable al frente.

Así mismo, en la siguiente representación 3D, se observa más claramente la deflexión aplicada a la columna.

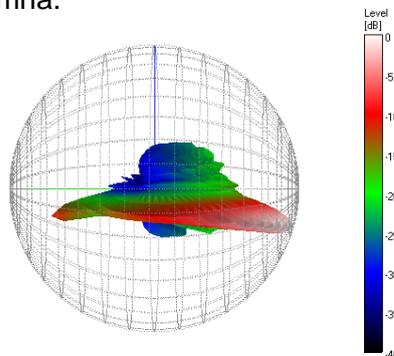


Figura 29. Diagrama polar 3D a 1KHz para una angulación de 15°

4.5.2 Constant Beamwidth Transducer (CBT)

El siguiente estudio de radiación realizado corresponde con la propuesta de conseguir un CBT. Como se ha explicado, un arreglo lineal de altavoces que emite como un CBT presenta un ancho de banda constante para cada una de sus frecuencias y para que esto suceda, resulta necesario aplicar un retardo y una atenuación de nivel a cada una de las cajas que conforman el sistema según la relación explicada en la fórmula [2] del apartado 3.3.

De esta manera, se han realizado en Excel todos los cálculos necesarios para que la columna recta, de manera virtual, presente una curvatura como la siguiente:

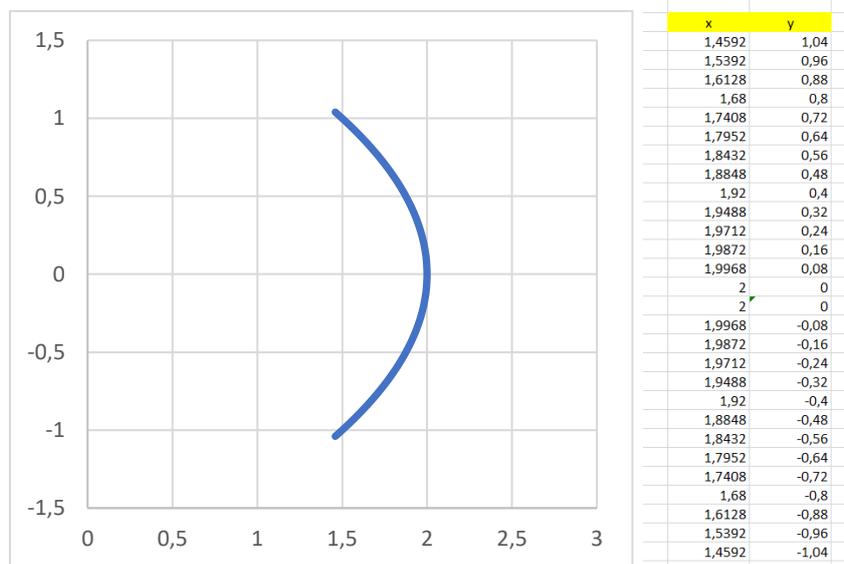


Figura 30. Curvatura para CBT deseada y sus posiciones

Para realizar una configuración CBT en arco, se parte del eje central de la columna, siendo el 0 la caja que se mantendrá sin procesado. Seguidamente, se le introduce un retardo y atenuación a cada caja de manera simétrica, es decir, la caja colocada en la posición (1'97, 0'24) recibirá el mismo procesado que la ubicada en la posición (1'97, -0'24).

Para conocer la atenuación que se debe aplicar a cada caja se parte de la fórmula [2]. Así mismo, para conocer el retardo en milisegundos necesario para cada caja, se realiza la siguiente operación:

$$[16] r = \frac{H - pos_n}{c} \cdot 1000$$

Siendo H la altura total del sistema (en metros), pos_n la posición X (virtual) de cada caja y c la velocidad del sonido en m/s.

| | | | | b [m] | c [m/s] | alpha0 [rad] | a [m] |
|------------|-------------|------------|------------|-------|---------|--------------|-------|
| | | | | 0,08 | 343 | 0,47952 | 2 |
| CBT | | | | | | | |
| n | alpha [rad] | Level [dB] | Delay [ms] | | | | |
| 13 | 0,4795193 | -324,26 | 1,57668 | | | | |
| 12 | 0,4475200 | -19,61 | 1,34344 | | | | |
| 11 | 0,4145069 | -13,50 | 1,12886 | | | | |
| 10 | 0,3805064 | -9,93 | 0,93294 | | | | |
| 9 | 0,3455556 | -7,43 | 0,75569 | | | | |
| 8 | 0,3097029 | -5,55 | 0,59708 | | | | |
| 7 | 0,2730087 | -4,07 | 0,45714 | | | | |
| 6 | 0,2355450 | -2,89 | 0,33586 | | | | |
| 5 | 0,1973956 | -1,96 | 0,23324 | | | | |
| 4 | 0,1586553 | -1,23 | 0,14927 | | | | |
| 3 | 0,1194289 | -0,68 | 0,08397 | | | | |
| 2 | 0,0798300 | -0,30 | 0,03732 | | | | |
| 1 | 0,0399787 | -0,07 | 0,00933 | | | | |
| 0 | 0,0000000 | 0,00 | 0,00000 | | | | |
| 0 | 0,0000000 | 0,00 | 0,00000 | | | | |
| -1 | -0,0399787 | -0,07 | 0,00933 | | | | |
| -2 | -0,0798300 | -0,30 | 0,03732 | | | | |
| -3 | -0,1194289 | -0,68 | 0,08397 | | | | |
| -4 | -0,1586553 | -1,23 | 0,14927 | | | | |
| -5 | -0,1973956 | -1,96 | 0,23324 | | | | |
| -6 | -0,2355450 | -2,89 | 0,33586 | | | | |
| -7 | -0,2730087 | -4,07 | 0,45714 | | | | |
| -8 | -0,3097029 | -5,55 | 0,59708 | | | | |
| -9 | -0,3455556 | -7,43 | 0,75569 | | | | |
| -10 | -0,3805064 | -9,93 | 0,93294 | | | | |
| -11 | -0,4145069 | -13,50 | 1,12886 | | | | |
| -12 | -0,4475200 | -19,61 | 1,34344 | | | | |
| -13 | -0,4795193 | -324,26 | 1,57668 | | | | |

Figura 31. Datos de atenuación y retardo para CBT

En la tabla presentada en la figura 31, se observa cómo se han tenido en cuenta un total de 26 cajas en lugar de 24, que es el total con el que cuenta el sistema. Esto es debido a que, para realizar los cálculos, resulta necesario añadir, de manera virtual, una caja más a cada lado para que la última caja real del sistema no sea la que sufre una atenuación total, es decir, que no sean estas las que sufren una atenuación superior a 60 dB.

Así pues, si se introducen en EASE los datos de atenuación y retardo para cada una de las 24 cajas que conforman el sistema, el resultado que se obtiene para las frecuencias de 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz y 4 KHz es el siguiente:

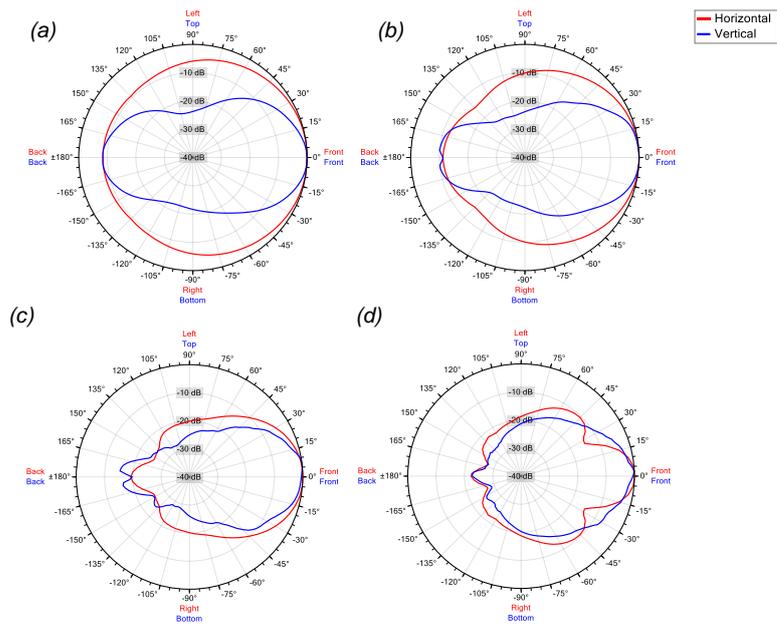


Figura 32. (a) CBT 500 Hz. (b) CBT 1 KHz (c) CBT 2 KHz. (d) CBT 4 KHz

En los diagramas polares presentados, se aprecia cómo el haz se mantiene constante en gran medida al ir aumentando la frecuencia. Además, el haz se presenta mucho más ancho que en el caso de la señal sin procesamiento CBT.

No obstante, en el siguiente diagrama de directividad, se puede comprobar cómo este efecto no es eficiente a partir de cierta frecuencia, lo cual se explica a continuación.

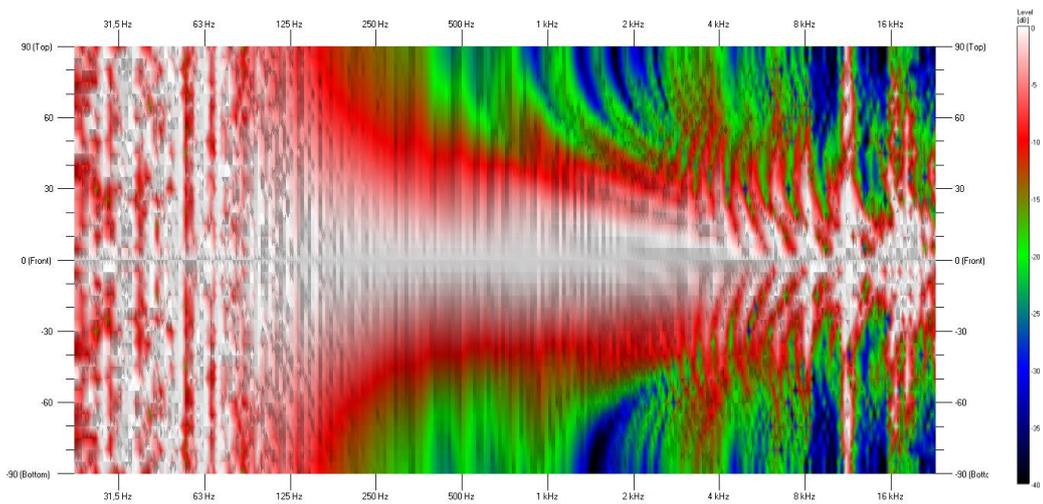


Figura 33. Diagrama de directividad CBT

En el diagrama de directividad se aprecia ese haz constante hasta la frecuencia correspondiente a los 3 KHz, aproximadamente. Punto a partir del cual, el sistema deja de comportarse de manera constante y empieza a lobular.

Esta frecuencia es conocida como la frecuencia de rotura del sistema y se presenta de la siguiente manera:

$$[17] f_r = \frac{2c}{3d}$$

Siendo c la velocidad del sonido (m/s) y d la distancia entre centros.

Por tanto, aplicando la ecuación [17] en este caso, se obtiene que la frecuencia de rotura del sistema es:

$$f_r = \frac{2 \cdot 343}{3 \cdot 0.08} = 2858 \text{ Hz} \approx 3000 \text{ Hz}$$

Que corresponde con la frecuencia a partir de la cual el sistema empieza a lobular, de acuerdo con lo presentado en el diagrama de directividad.

5. Resultados

Atendiendo a lo expuesto en los apartados 4.5.1 y 4.5.2, se comentan a continuación los resultados obtenidos y la comparativa con el sistema original sin procesar.

Respecto a las representaciones obtenidas en la configuración para un apuntamiento electrónico de 15° , se tiene lo siguiente:

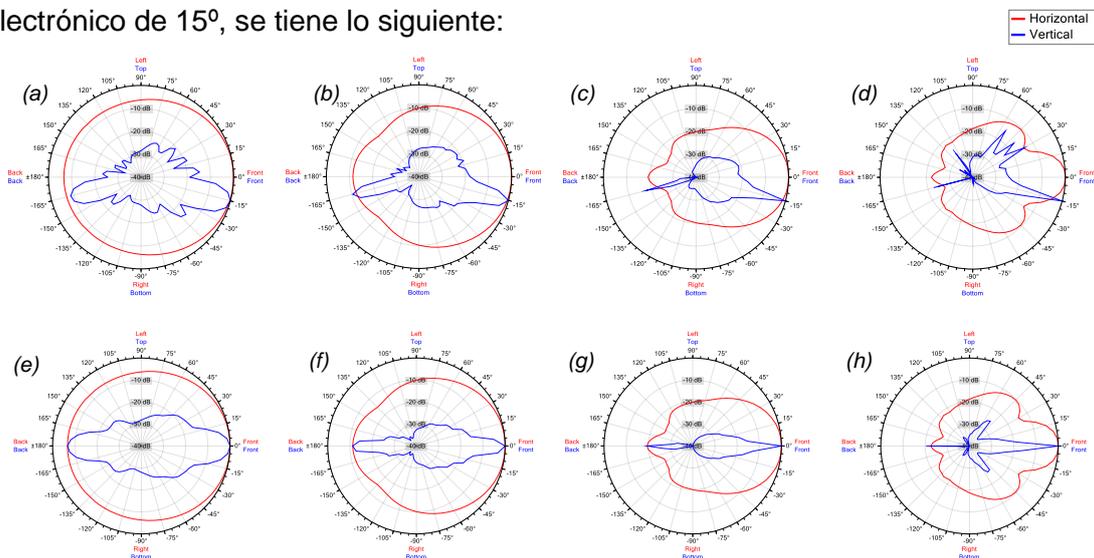


Figura 34. (a) Apuntamiento 15° 500 Hz. (b) Apuntamiento 15° 1 KHz. (c) Apuntamiento 15° 2 KHz. (d) Apuntamiento 15° 4 KHz. (e) Sistema sin procesar 500 Hz. (f) Sistema sin procesar 1 KHz. (g) Sistema sin procesar 2 KHz. (h) Sistema sin procesar 4 KHz

Se confirma el correcto funcionamiento del apuntamiento electrónico a 15° comparado con los diagramas polares de la columna sin procesar, la cual está dirigida a 0° , ya que está colocada en una posición recta.

Se comprueba también que en el apuntamiento electrónico la gran mayoría de los haces traseros, efectivamente, se dirigen hacia el frente sumándose a los lóbulos principales y que, la radiación trasera existente se concentra también a 15° ; a excepción de lo representado en el diagrama polar a 4 KHz que presenta unos haces de radiación a 30° , 45° y 60° , pero como estos niveles se mantienen en -15 dB, no resultan de interés significativo.

Además de esto, se observa de manera más clara la deflexión existente al realizar la comparativa con el sistema original:

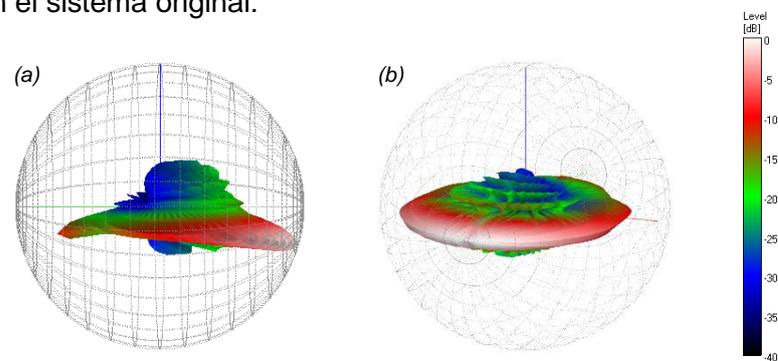


Figura 35. (a) Apuntamiento 15° 1 KHz. (b) Sistema sin procesar 1 KHz.

Ambas representaciones 3D, como indica la figura, corresponden a la frecuencia de 1 KHz. Se puede confirmar que en el caso (b) el sistema se mantiene centrado en el eje, mientras que en el caso (a) se presentan las deflexiones mencionadas tanto para la parte trasera como para la frontal. Esto, frente al sistema sin procesar, permite dirigir de forma muy precisa el haz de radiación hacia la zona de audiencia realmente deseada.

Con respecto a lo que concierne a la configuración CBT lograda, los resultados obtenidos, comparados con el sistema sin procesar son los siguientes:

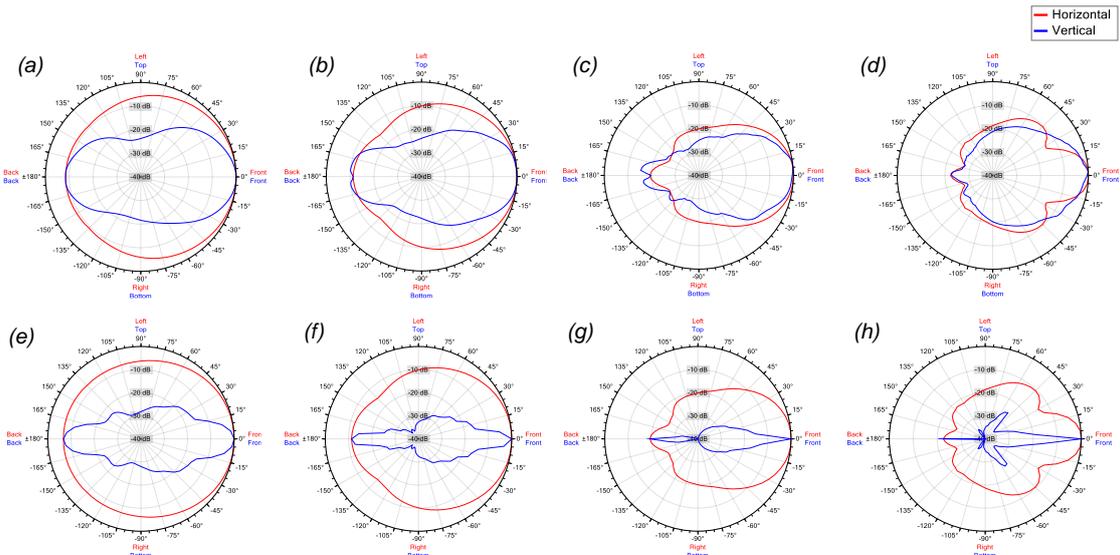


Figura 36. (a) CBT 500 Hz. (b) CBT 1 KHz. (c) CBT 2 KHz. (d) CBT 4 KHz. (e) Sistema sin procesar 500 Hz. (f) Sistema sin procesar 1 KHz. (g) Sistema sin procesar 2 KHz. (h) Sistema sin procesar 4 KHz

Se consigue ensanchar el haz para cada frecuencia y se consigue mantener un ancho de banda constante hasta la frecuencia de rotura, aunque a 4 KHz sigue presentando buenos resultados. El ensanchamiento del haz es provocado por la configuración en arco escogida, ya que dicha configuración permite una mayor concentración de los haces de radiación, dado que la energía sonora se dirige angulada (virtualmente) hacia un mismo punto.

Además, en la siguiente figura se puede apreciar la variación del ancho de banda por frecuencias del sistema original frente al sistema CBT:

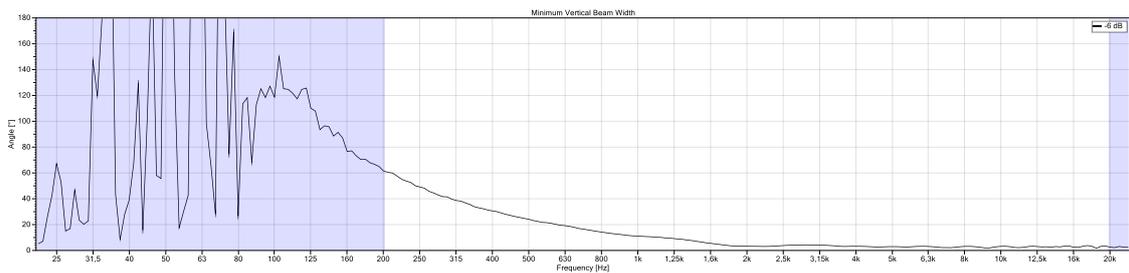


Figura 37. Gráfica variación BW por frecuencias del Sistema sin procesar. Eje Y ángulo de apertura a -6 dB

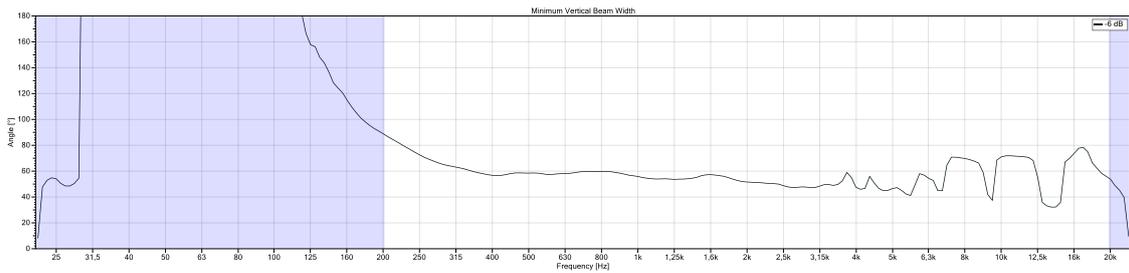


Figura 38. Gráfica variación BW por frecuencias para CBT. Eje Y ángulo de apertura a -6 dB

En ambas gráficas se puede comprobar más claramente cómo existe un mayor estrechamiento del haz en el sistema original a medida que va aumentando la frecuencia, presentándose una disminución del ancho de banda pronunciada en el paso de las frecuencias graves a las medias-agudas, teniendo en las más agudas un ancho de banda muy estrecho.

Sin embargo, en el sistema configurado como CBT, el ancho de banda se presenta de manera constante desde los 315 Hz hasta los 2'5 KHz, pasada esta frecuencia el sistema sigue conservando, en parte, esta respuesta constante, pero en las frecuencias más agudas ya priorizan los lóbulos secundarios y algunas variaciones en amplitud.

6. Conclusiones

Después de los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto y de acuerdo con los conocimientos adquiridos, el procesado digital de un sistema resulta beneficioso para lograr configuraciones que se adapten a las necesidades técnicas del espacio y de la audiencia a la que va dirigida. Además, cuenta con la facilidad de poder modificar la configuración escogida in situ, si los cambios de temperatura, la zona de audiencia o el espacio lo requieren.

Sin embargo, dicho procesado digital necesita de muchos más recursos que en el caso de un sistema que ha sido angulado de forma mecánica, ya que, en la angulación virtual se necesita un canal de amplificación por cada caja para poder aplicar todos los procesos de señal pertinentes, siendo esto motivo de que el uso de este tipo de sistemas quede más reducido a aplicaciones más específicas como sistema fijo en interiores.

Por otra parte, los resultados obtenidos para el caso del apuntamiento electrónico, como se ha comentado en el apartado 5, han resultado muy satisfactorios puesto que se han conseguido los resultados esperados y se ha podido confirmar la efectividad que presenta este sistema para espacios en los cuales se necesita acotar la zona de audiencia y dirigir los haces hacia un único punto evitando las posibles reflexiones. Este

tipo de configuraciones resultan realmente interesantes y efectivos para espacios sumamente reverberantes como pueden ser las iglesias, los pabellones deportivos...

Por lo que respecta a los resultados obtenidos para la configuración CBT, se ha podido demostrar el ensanchamiento del haz y la constancia del ancho de banda. No obstante, los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios, puesto que no ha sido posible conseguir que el ancho de banda sea constante para todo el rango de frecuencias útil del sistema; pero sí que ha sido posible que lo sea para el rango que comprende a las frecuencias de la voz humana.

Así mismo, se confirma para ambas configuraciones el correcto funcionamiento de la simulación al acoplar diversas fuentes a partir de la repetición de un altavoz base.

Finalmente, en futuras líneas de investigación sobre este aspecto, se propone trabajar con matrices en vez de con columnas, dado que con esta opción se espera conseguir mejores resultados.

7. Bibliografía

- [1] Colaboradores de Wikipedia. *Acústica* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2020 [fecha de consulta: 25 de agosto del 2021]. Disponible en <<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ac%C3%BAstica&oldid=130272065>>.
- [2] D. B. Keele, Jr., "The Application of Broadband Constant Beamwidth Transducer (CBT) Theory to Loudspeaker Arrays," 109th Convention of the Audio Engineering Society, Preprint 5216 (Sept. 2000).
- [3] Colaboradores de Unisalia. *Que es un altavoz de bobina móvil – Construcción y consideración* [en línea]. Unisalia, [fecha de consulta: 2 de julio del 2021]. Disponible en <<https://unisalia.com/altavoz-de-bobina-movil/>>.
- [4] P. Rodríguez. *Anatomía del altavoz: Factores que influyen en la calidad del sonido* [en línea]. Xataka, 2013 [fecha de consulta: 10 de julio del 2021]. Disponible en <<https://www.xataka.com/audio/anatomia-del-altavoz-factores-que-influyen-en-la-calidad-del-sonido>>.
- [5] Colaboradores de Wikipedia. *Line array* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 11 de julio del 2021]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Line_array&oldid=133328220>.
- [6] P. H. Rogers, and A. L. Van Buren, "New Approach to a Constant Beamwidth Transducer," J. Acous. Soc. Am., vol. 64, no. 1, pp. 38-43 (1978 July).

- [7] A. L. Van Buren, L. D. Luker, M. D. Jevnager, and A. C. Tims, "Experimental Constant Beamwidth Transducer," J. Acous. Soc. Am., vol. 73, no. 6, pp. 2200-2209 (1983 June).
- [8] D. B Keele, Jr., "The Full-Sphere Sound of Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Line Arrays," 114th Convention of the Audio Engineering Society, Preprint 5746 (March 2003).
- [9] Colaboradores de ULPGC. *Altavoces* [en línea]. ULPGC, PDF de descarga directa [fecha de consulta: 15 de julio del 2021]. Disponible en <<http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/24/24264/alavoces.pdf>>.
- [10] Norma Española UNE-EN 60268-5: "Equipos para sistemas electroacústicos, Parte 5: Altavoces", pág. 23-24, 27-29, (Abril 2004).
- [11] E. Sacerdoti. *Parámetros Thiele-Small* [en línea]. Equaphon University, (Nov 2017) [fecha de consulta: 2 de agosto del 2021]. Disponible en <<https://www.equaphon-university.net/parametros-thiele-small/>>.
- [12] B. Lorente, F. Castells, R. Picó, "Estudio de métodos de cálculo de retardo en agrupaciones de altavoces para apuntamiento electrónico del frente de ondas", XI Congreso Ibérico de Acústica, 51º Congreso Español de Acústica, Tecniacústica 2020 (Oct. 2020).
- [13] IES Los Viveros. *Equipos de Sonido: Dptº Electrónica, Tema 3: Altavoces* [en línea]. IES Los Viveros, PDF de descarga directa [fecha de consulta: 18 de agosto del 2021]. Disponible en <<http://www.ieslosviveros.es/alumnos/asig8/carpeta729/3altavocesPDF.pdf>>.
- [14] Colaboradores de Wikipedia. *Altavoz* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 18 de agosto del 2021]. Disponible en <<https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Altavoz&oldid=137935164>>.
- [15] D. Davis, E. P. Jr., P. Brown. "Sound System Engineering", 4th Edition, Chapter 9, pág. 153-156.
- [16] I. Mateljan. "LIMP. Programa para la medición de la impedancia de altavoces. Manual de usuario", pág. 23-24, (Feb. 2007).