

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

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



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Mejora de un sistema de megafonía en base a la teoría de Line Arrays”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
González García, Ángel

Tutor/a:
Alba Fernández, Jesús

GANDIA, 2017

AGRADECIMIENTOS

“Quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo de mi familia y a mis compañeros Christian García y Pedro, así como a Juan Carlos y al tutor del proyecto por la ayuda ofrecida para llevar a cabo el proyecto”

RESUMEN

Una de las técnicas para la mejora del alcance y directividad de los equipos de audio para grandes superficies es la construcción de una agrupación de altavoces o Line Array. El presente TFG trata de conseguir un nuevo sistema para megafonía y/o bandos de exteriores que mejore el alcance utilizando la teoría de Line-Array. El problema principal de estos sistemas de megafonía es que sólo pueden colocarse en ciertos sitios, limitando mucho el alcance por la distancia a cubrir. Dicha teoría puede permitir que la propagación del sonido se comporte como una fuente lineal, y no como una fuente puntual, mejorando así las condiciones del sistema. En este TFG se construirá y validará un sistema para exteriores con materiales proporcionados por la Universidad.

Palabras Clave: Electroacústica, megafonía, bando, Line-Array, Nivel de presión sonora, Directividad

ABSTRACT

One of the techniques for improving the range and directivity of audio equipment for large surfaces is the construction of a group of loudspeakers or Line Array. The present TFG tries to get a new system for public address systems and / or outdoor parties that improves the range using Line-Array theory. The main problem with these public address systems is that they can only be placed in certain places, limiting the reach by the distance covered. This theory may allow the propagation of sound to behave as a linear source, and not as a point source, thus improving system conditions. In this TFG a system for exteriors with materials provided by the University will be built and validated.

Keywords: Electroacoustics, megaphony, band, Line-Array, Sound Pressure Level, Directivity

ÍNDICE

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Presentación.....	1
1.2. Objetivos	1
1.3 Metodología	1
1.4 Etapas	2
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Parámetros de un altavoz	3
2.1.1 Impedancia eléctrica y curvas de impedancia	3
2.1.2. Respuesta en frecuencia del altavoz.....	4
2.1.3 Directividad	5
2.2. Estructura de las bocinas	6
2.3 Teoría de Line Array	8
2.3.1 Ley de los cuadrados inversos.....	8
2.3.2 Fuente lineal vs. Fuente puntual.....	9
2.3.3 Parámetros de un Line-Array	10
2.3.3.1 Directividad	10
Capítulo 3. DESARROLLO DEL TRABAJO	15
3.1. Material utilizado	15
3.2.3 Respuesta en frecuencia	18
3.2.4 Diagrama de directividad	20
3.3 Simulación de los parámetros del Line-Array	21
3.3.1 Parámetros iniciales	22
3.3.2 Simulación de la directividad	22
3.4 Montaje experimental.....	24
3.5 Medida en cámara anecoica del prototipo	25
Capítulo 4. conclusiones DEL TRABAJO	29

4. Conclusiones del experimento realizado	29
4.1 Propuestas de mejora	30
5. BIBLIOGRAFÍA	31
Capítulo 6. ANEXOS	32

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación

Desde que, en 1957, el pionero Harry Olson publicara sus conclusiones acerca del efecto Line-Array en su texto "Ingeniería Acústica"[19] y definiera el concepto, ha habido grandes avances en el campo de las agrupaciones de altavoces. Éste demostró que, al juntar una columna de altavoces, se reducía la pérdida de energía con la distancia a la mitad respecto a un único altavoz emitiendo.

El motivo del presente trabajo se ve motivado por el interés en el aprendizaje del campo de los Line-Array y en estudiar los efectos apreciables tanto en la teoría como en la práctica, tales como directividad, potencia radiada, mejoras en la eficiencia, respuesta en frecuencia de los altavoces. Además, permite un avance en la problemática de colocación de altavoces de bocina de megafonía para bandos en municipios, donde es complicado cubrir todas las áreas de interés desde los edificios públicos, único sitio donde se pueden instalar de forma usual.

1.2. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo principal el diseño, construcción y análisis de un Line-Array para aplicación en exteriores en base a altavoces de bocina de uso común en sistemas de bando y megafonía. Se pretende aumentar el alcance del sistema de megafonía de exteriores clásico combinando de forma adecuada dichos altavoces.

Además, como objetivos secundarios se tienen el conocimiento y estudio de los altavoces de bocina y la teoría que arrastra tal tipo de equipos, así como la caracterización individual de todos los parámetros convenientes a analizar, tales como directividad, respuesta en frecuencia o impedancia.

1.3 Metodología

Con el fin de llevar a cabo el proyecto y alcanzar los objetivos, se ha seguido una metodología del tipo cuantitativo, por lo que a lo largo del proyecto se siguen unos pasos y procesos estándar con tal de poder medir de forma controlada todos los parámetros a fin de obtener unos datos aceptables para poder emitir un juicio de valor objetivo que pueda describir de manera adecuada los resultados obtenidos en el experimento realizado.

1.4 Etapas

El presente trabajo consta de varias etapas. En primer lugar, se recopilará toda la información necesaria sobre el marco teórico que engloba al proyecto con tal de conocer en materia. Posteriormente, ya que los equipos han estado tiempo en desuso y tampoco tienen información de sus datos técnicos, se caracterizarán individualmente las medidas electroacústicas de los altavoces de bocina a utilizar a lo largo del experimento estudiando su impedancia, comportamiento en frecuencia y directividad, comparando con la hoja técnica del fabricante. A continuación, se realizará un diseño teórico preliminar del sistema Line-Array, así como una toma de decisiones para el prototipado, tales como el número de altavoces, el alcance del mismo y la directividad conjunta. Seguidamente, se realizarán pruebas prototipo en interior (cámara anecoica); se comprobará si cumple con lo establecido en la teoría en lo referente al alcance del Line-Array y se concretarán una serie de posibles propuestas de mejora. Finalmente se redactará el proyecto realizado.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Parámetros de un altavoz

Los parámetros de interés de los altavoces a estudiar para el buen entendimiento del desarrollo del presente trabajo son: Impedancia, directividad, y respuesta en frecuencia.

2.1.1 Impedancia eléctrica y curvas de impedancia

En primer lugar, la impedancia eléctrica (Z_{ET}) es la oposición al paso de la corriente alterna que se mide a la salida del amplificador mirando hacia el altavoz como referencia (tal como se puede observar en la figura 1).

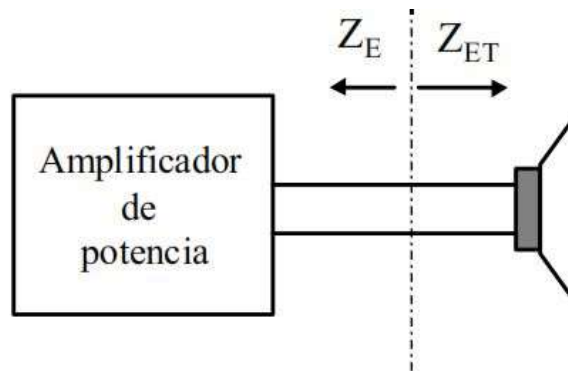


Figura 1: Punto de medida de la impedancia [8]

La impedancia de los altavoces varía en función de la frecuencia, por ello, se crean curvas de impedancia tal y como muestra la figura 2, que permiten analizar mejor la impedancia nominal del altavoz, así como su impedancia mínima y características de resonancia del altavoz.

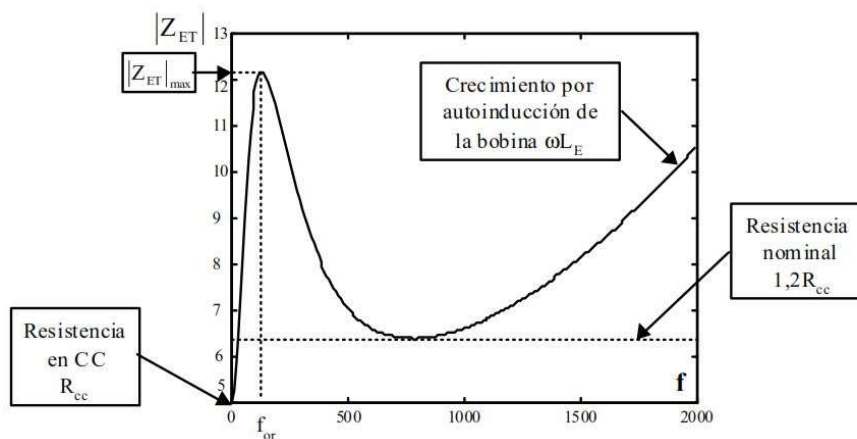


Figura 2: Curva de impedancia de un altavoz [8]

Esta impedancia (Z_{ET}) del altavoz dinámico está formada por tres tipos de impedancia: La impedancia eléctrica pura (Z_E) debido a la resistencia y autoinducción de la bobina móvil, así como de las corrientes que se inducen en la bobina debido a su desplazamiento por el campo magnético; la impedancia mecánica (Z_{MOV}) debida a la masa de bobina, resistencia de pérdidas y compliancia de la suspensión y rigidez del cono, y la impedancia mecánica de radiación (Z_{MR}), que es el efecto del medio de propagación sobre ambas caras del diafragma.

A partir de estas curvas podemos sacar lo que se conoce como parámetros no directivos de un altavoz. Estos son:

- La resistencia eléctrica (R_E)
- La frecuencia de resonancia del altavoz
- El crecimiento por autoinducción de la bobina
- Resistencia nominal del altavoz

2.1.2. Respuesta en frecuencia del altavoz

En segundo lugar, la respuesta en frecuencia es una representación del nivel de presión sonora emitido por el altavoz a lo largo del espectro audible (Figura 3). Como norma, se emplea 1 Watt de potencia para realizar la medida a un metro de distancia de la fuente emisora, creándose así parámetros a partir de esta medida tales como:

- Rendimiento. (ρ) Se define como la relación entre la potencia acústica radiada por la fuente y la potencia eléctrica que se le entrega al mismo. Por norma general, el rendimiento de un altavoz es muy bajo, y suele estar comprendido entre valores del 1-5%.
- Sensibilidad. (S) Esta se define como el nivel de presión sonora que se obtiene a 1 metro de la fuente excitando el altavoz con 1 Watt de potencia a 1000 Hertz.

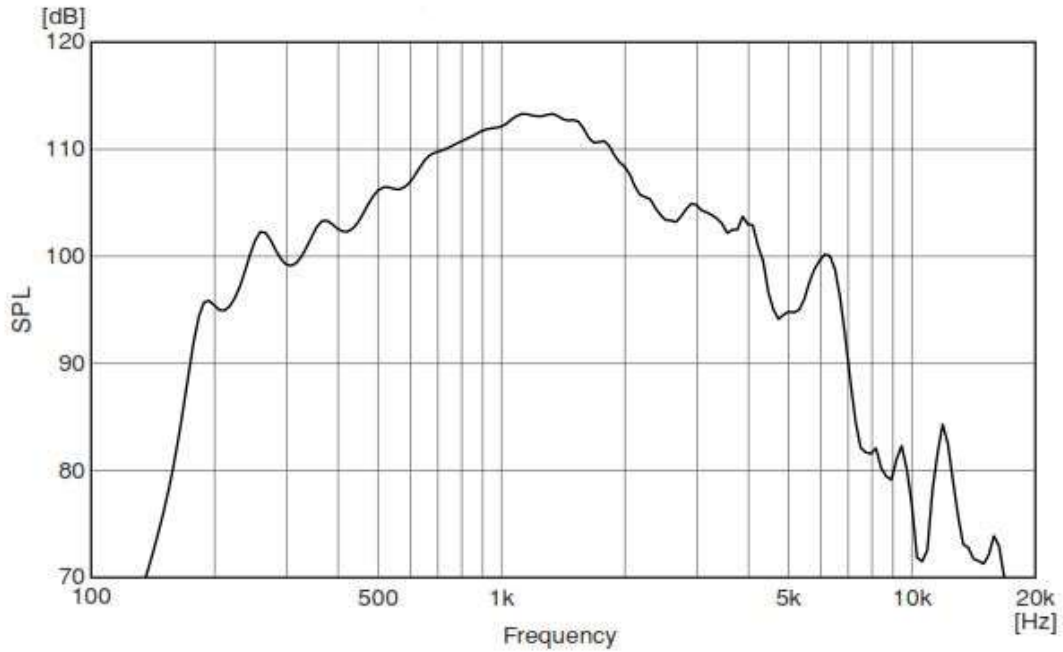


Figura 3: Respuesta en frecuencia del megáfono medida por el fabricante

2.1.3 Directividad

Por último, la directividad es el módulo del cociente entre presión eficaz en un punto y la presión tomada como referencia (normalmente, la presión máxima situada a 0 grados).

$$D(\theta) = \left| \frac{P(\theta)}{P_{max}} \right| \rightarrow D_{dB} = 20 \log \frac{P(\theta)}{P_{max}}$$

Su representación polar es el diagrama de directividad, tal y como muestra la siguiente figura.

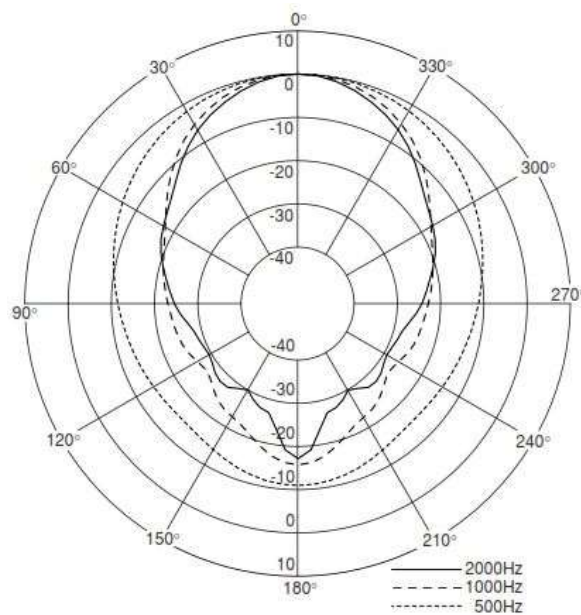


Figura 4: Diagrama de directividad del megáfono ofrecida por el fabricante (Anexo I)

Otro parámetro de interés obtenido a partir de la directividad es el Factor de Directividad, definido por la relación entre la intensidad acústica producida por una fuente en una dirección concreta y la intensidad producida por una fuente isotrópica a la misma potencia.

$$Q(\theta_0, \psi_0) = \frac{I(\theta_0, \psi_0)}{I_{ISO}} \rightarrow DI(dB) = 10\log(Q)$$

2.2. Estructura de las bocinas

Con el fin de entender el funcionamiento de los sistemas de megafonía se explicará su tipología, así como las diferencias con respecto a otro tipo de altavoces.

Los megáfonos están formados por dos partes: la bocina y el motor de compresión. En la figura 5 se muestra el megáfono de este proyecto.



Figura 5: Megáfonos TC-630 utilizados en el trabajo (Anexo I)

La bocina es un tipo de guía de ondas acústicas por la que sucede una transición de la impedancia acústica entre inicio y final de la misma. Usualmente, estas bocinas son de grandes superficies, por lo que permite una radiación eficiente de la energía en el aire que la rodea, reduciendo así al mínimo las reflexiones posteriores al inicio de la garganta de la bocina. Este efecto se conoce como radiación indirecta o efecto de carga de la bocina.

Los megáfonos se catalogan como altavoces de radiación indirecta. A estos, se les intercala un dispositivo entre el diafragma del altavoz y el aire, con el objetivo de acoplar la impedancia de ambos. Este dispositivo es la bocina, que adapta la alta impedancia del diafragma a la baja impedancia del aire. Así, de este modo se obtiene una mejora en el rendimiento del altavoz. Los motivos de la mejora son la transformación de más energía eléctrica en acústica.

En caso de no utilizar la bocina, se estaría gastando la misma energía eléctrica obteniendo una menor energía acústica.

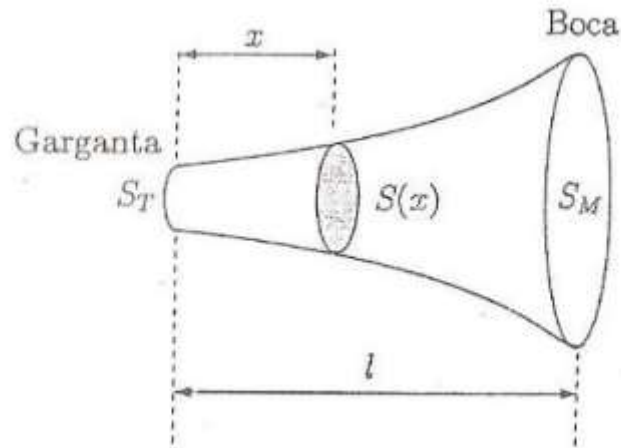


Figura 6: Constitución de una bocina [6]

Toda la información sobre el comportamiento de una guía de ondas queda reflejada en el documento [6] de la bibliografía.

La segunda parte del megáfono es el motor de compresión o unidad motriz de compresión, el cual es básicamente un altavoz electrodinámico de bobina móvil, pero con algunas peculiaridades tales como una cámara de compresión, un diafragma pequeño y lo más ligero posible, así como la estructura para poder anclarlo a la bocina. Su principio de funcionamiento es el de la transducción electrodinámica, generando movimiento a partir de una corriente que circula por la bobina inmersa en un campo magnético, produciendo unas diferencias de presión en el aire que se propagan en forma de sonido.

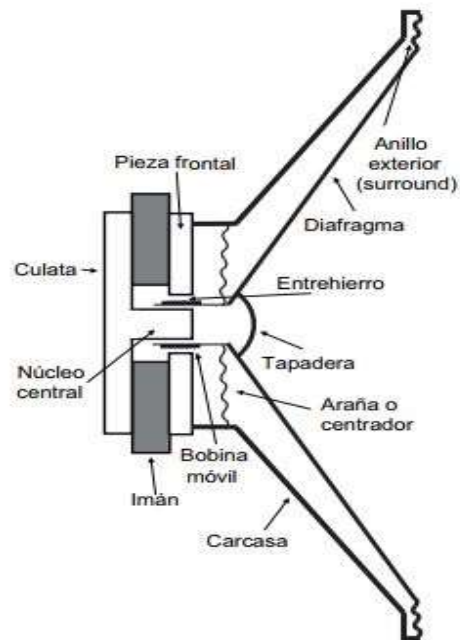


Figura 7: Partes de un altavoz electrodinámico de bobina móvil [8]

2.3 Teoría de Line Array

2.3.1 Ley de los cuadrados inversos

Para poder explicar el funcionamiento de una agrupación lineal de altavoces, es necesario explicar primero la Ley de los cuadrados inversos.

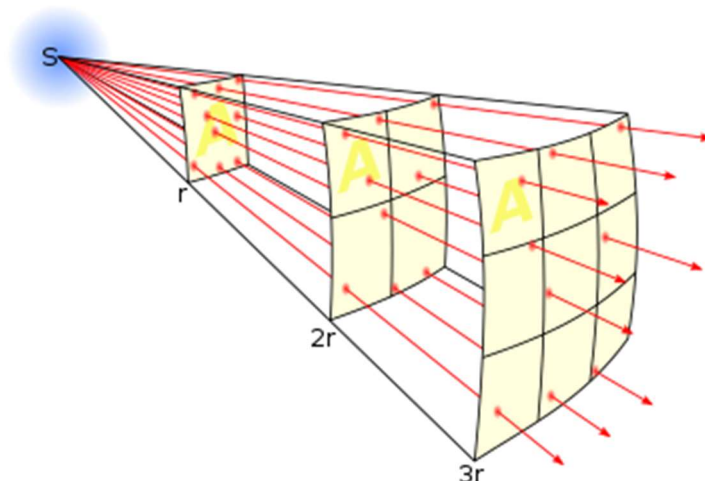


Figura 8: Efecto de la propagación de ondas acústicas de una fuente puntual [5]

Dicha ley afirma que, el nivel de intensidad del sonido que proviene de una fuente puntual, despreciando tanto reflexiones como reverberaciones, cae 6 dB cada vez que dobla la distancia de medida, por lo que disminuye de acuerdo con el cuadrado de la distancia a la fuente de emisión. Tal efecto se puede comprobar claramente en la imagen anterior, donde se observa que al doblar la distancia desde el emisor($2r$) la energía que emite la fuente se esparce sobre un área que ahora es cuatro veces mayor, decayendo esta una cuarta parte. (Cuadrado de la distancia)

Así, por ejemplo, si a 1 metro de distancia se tiene un nivel de presión sonora de 90 dB, se puede deducir que a 2 metros de distancia se tendrán en torno a 84 dB, y a cuatro metros sobre unos 78 dB.

2.3.2 Fuente lineal vs. Fuente puntual

Una vez entendida la ley de los cuadrados inversos para una fuente puntual, se puede explicar para una fuente lineal, que será el caso de interés para el presente trabajo.

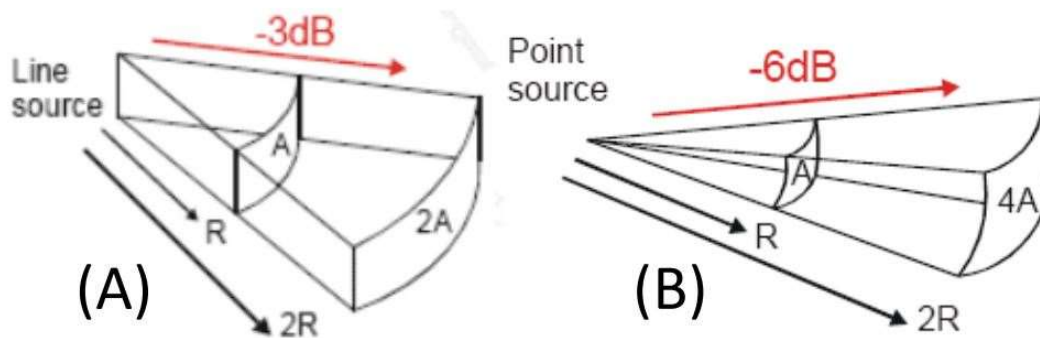


Figura 9: Comparación de la propagación de las ondas acústicas desde fuente lineal (A) y desde una fuente puntual (B) [5]

En una fuente lineal, tal como se puede observar en la anterior figura en (A), al doblar la distancia al emisor, el área de cobertura es solo el doble, debido a que las ondas que emite el emisor han pasado de ser esféricas (fuente puntual) a ser cilíndricas (fuente lineal). Es por ello, que la atenuación en agrupaciones lineales al doblar la distancia al emisor decae tan solo 3 dB, la mitad en comparación a las pérdidas por una fuente puntual.

Cabe destacar que una fuente lineal de una dimensión A se comporta como tal hasta una distancia entre fuente y emisor A/π , donde empezará a comportarse como una fuente puntual. A este concepto se le conoce como el límite del campo cercano

Por ello, se puede razonar que los sistemas de amplificación de audio tales como el Line-Array utilizan como principio de funcionamiento la combinación de varias fuentes esféricas para obtener una gran fuente lineal (frente de ondas prácticamente plano) y así obtener menor pérdida de radiación a medida que va aumentando la distancia, todo ello debido a una suma coherente de las distintas fuentes, haciendo que se comporte como una única fuente de sonido.

2.3.3 Parámetros de un Line-Array

2.3.3.1 Directividad

La directividad de un altavoz varía con la frecuencia. A frecuencias bajas se tiene un comportamiento muy omnidireccional y unas longitudes de onda muy grandes. Sin embargo, conforme va aumentando la frecuencia, la directividad se va estrechando.

Tal como se ha explicado en el apartado 2.2, la directividad para una fuente viene dada por la siguiente expresión:

$$D(\theta) = \left| \frac{P(\theta)^2}{P_{max}} \right| \rightarrow D_{dB} = 20 \log \frac{P(\theta)}{P_{max}}$$

Sin embargo, al estudiar la directividad de una agrupación lineal de altavoces, la expresión a utilizar será la siguiente [15]:

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin \frac{n\phi}{2}}{n \sin \frac{\phi}{2}} \right|; \phi = kb \cos \theta - \psi$$

Siendo n=número de fuentes; y b la distancia entre centros de los altavoces(m)

Si se agrupan varias fuentes una sobre la otra, y se ponen en funcionamiento con la misma señal, el patrón de directividad varía. Se observará que en el eje de las fuentes se conseguirán interferencias constructivas, aumentando la presión sonora (por ejemplo, 6 dB si se tienen dos fuentes, con respecto a tener una). Al medir en otros puntos que se sitúen fuera del eje, se producirán cancelaciones por las diferencias de trayectorias debido a los patrones individuales de las fuentes, dando como resultado unos niveles de presión menores. Este tipo de interferencia recibe el nombre de “combing” [10].

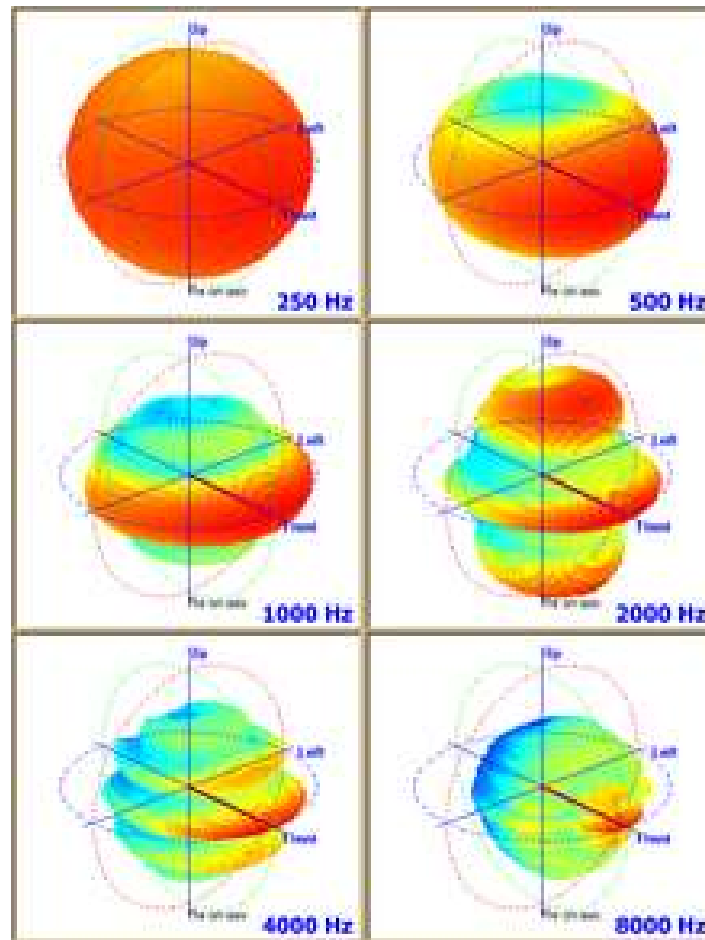


Figura 10: Gráficos tridimensionales de la directividad de una agrupación lineal para varias frecuencias [10]

Tal como se observa en la figura 9, a bajas frecuencias el Line Array se comporta de forma omnidireccional, pero al subir la frecuencia, va estrechando su directividad, creando zonas con niveles menores (*combing*)[10].

A partir de la directividad del Line-Array, se puede determinar su cobertura. La **cobertura del array** [7] es el ancho de haz en el cual caen 6 dB. Sigue la siguiente expresión:

$$\theta_{-6\text{ dB}} = 2 \sin^{-1} \frac{6\lambda}{l}$$

Donde λ es la longitud de onda y l la longitud de la agrupación de altavoces.

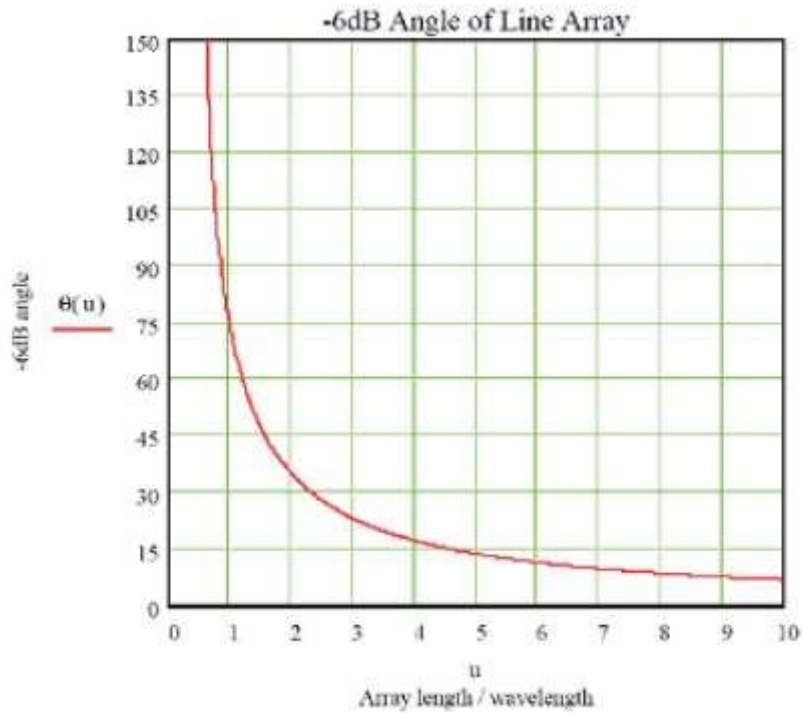


Figura 11: Gráfico comparativo de la cobertura de un Line-Array en función del cociente entre la longitud del mismo y la longitud de onda que emite. [7]

Tal como indica la figura 10, la cobertura de la agrupación lineal decrece exponencialmente con la longitud de onda que emite, siendo su comportamiento claramente directivo a altas y frecuencias, y muy omnidireccionales en las bajas frecuencias.

Se puede observar un ejemplo teórico de diagrama de directividad para una agrupación lineal de fuentes en la figura 11, donde se ha realizado una simulación para ilustrar la situación. En la simulación se aprecian muchos lóbulos secundarios debido al efecto del *combing*.

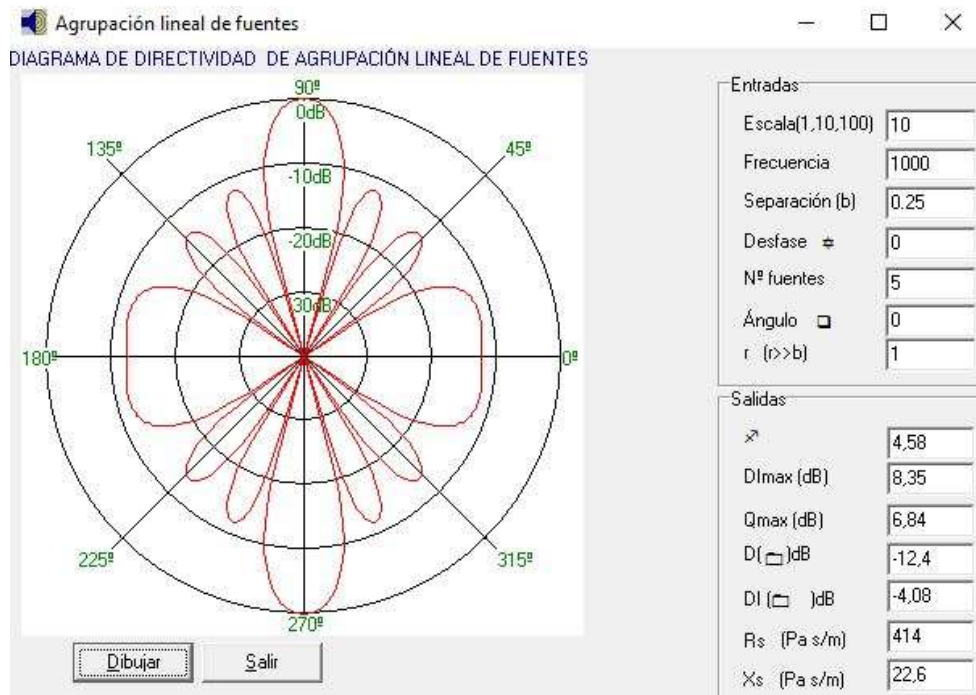


Figura 12: Diagrama teórico de directividad para un ejemplo de 5 fuentes distadas 0.25 m entre sí y para 1 KHz

Con el objetivo de conseguir un acoplamiento eficaz, y sumar de manera coherente los frentes de ondas en fase, los transductores deberían reproducir únicamente el rango de frecuencias cuya longitud de onda sea lo suficientemente grande en comparación con la distancia entre los centros de los altavoces [10].

$$d \leq \frac{\lambda}{2}$$

A medida que disminuye la longitud de onda, van apareciendo más interferencias destructivas, y por consecuencia, más lóbulos secundarios y un comportamiento menos omnidireccional y más directivo del Line-Array.

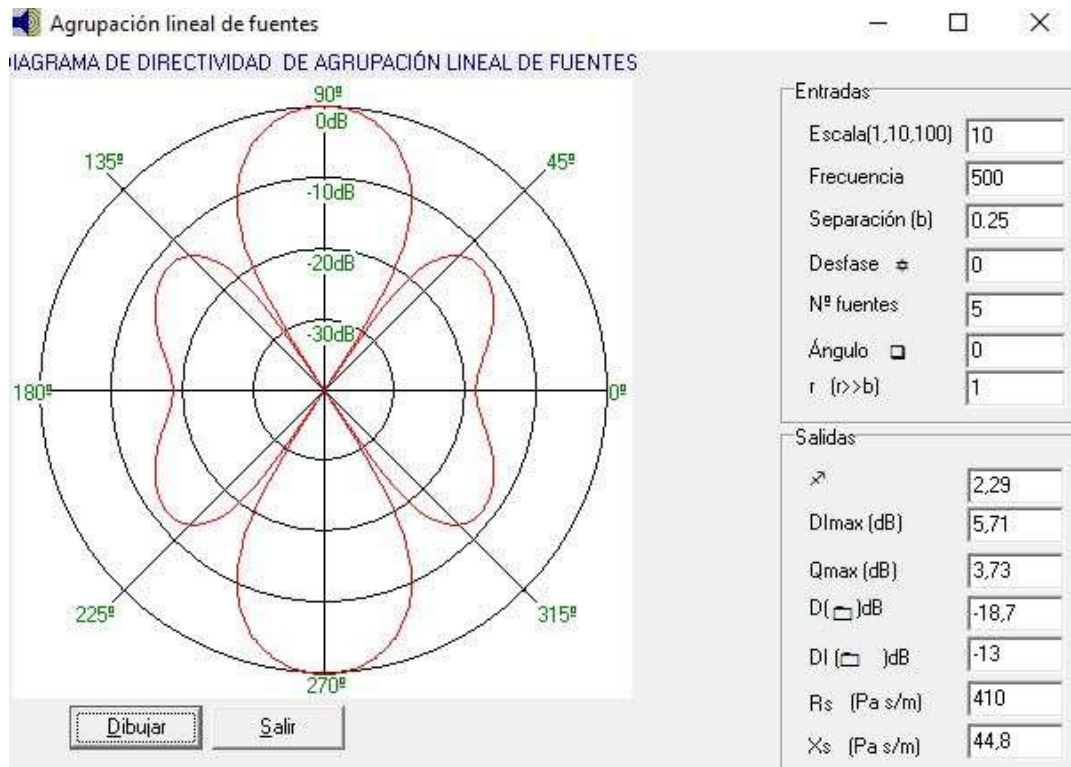


Figura 13: Mismo ejemplo que en la figura 11, pero ajustando la frecuencia para acoplamiento eficaz y evitar lóbulos severos

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Material utilizado

Para el desarrollo del experimento, se ha empleado la siguiente lista de equipo y material:

- 4 Bocinas TOA TC-630
- Multímetro Digital
- Sonómetro Brüel & Kjær
- Software CLIO v.10 y amplificador QBOX fw
- Generador de ruido Behringer Ultra-Curve
- Amplificador de señal Brüel & Kjær Type 2716
- Soporte motorizado para rotación de precisión OUTLINE
- Base de anclaje para fijar las bocinas
- Soporte de micrófono
- Cableado
- Listones de madera reciclados para la estructura
- Tornillería y herramientas de marquería.

3.2 Caracterización de los megáfonos

Para el presente trabajo, se han utilizado unos megáfonos diseñados para aplicaciones en las que se necesite cubrir una gran distancia en exteriores, ya que además son elementos resistentes a lluvia. Están centrados en aportar una alta inteligibilidad en discursos y mensajes hablados. A fin de conocer de forma más precisa todos los parámetros del altavoz mencionados anteriormente, y con tal de asegurar y comprobar la correcta información proporcionada por el catálogo del fabricante, teniendo en cuenta además que son elementos que han estado almacenados sin uso varios años, se ha procedido a medir las características de impedancia, respuesta en frecuencia y directividad de los megáfonos, los cuales se describirán con detalle a continuación.

Se han etiquetado los megáfonos correspondientes con los números del 1 al 4 para poder distinguirlos y clasificarlos.

3.2.1 Medida de la resistencia eléctrica

En primer lugar, con la ayuda de un multímetro digital, se ha medido la resistencia eléctrica que presentan los altavoces ante el paso de una corriente continua. Para obtener la medida, se ha configurado el multímetro a la escala adecuada, y conectando en bornes del altavoz, se han obtenido los siguientes valores de impedancia:

Nº megáfono	Resistencia eléctrica (Ω)
1	16
2	8
3	8
4	16

Tabla 1: Resistencia eléctrica de los megáfonos

3.2.2 Curvas de impedancia

En siguiente lugar, con el fin de representar las gráficas de las curvas de impedancia en función de la frecuencia, se ha utilizado el software CLIO v.10(Anexo II) y el amplificador QCBOX fw, el cual lo ha facilitado la Universidad.

Se ha conectado el canal de salida del amplificador a los bordes de cada megáfono mediante conectores Jack-Cocodrilo. Del mismo modo, para recoger los cambios de voltaje con la frecuencia, se conectan los bornes del mismo a la entrada del amplificador. Para realizar la curva, el software emplea un barrido de tonos sinusoidales de duración corta a lo largo de todo el espectro. Para este caso, se ha empleado una resolución de 1/3 de octava, el cual se ha considerado suficiente para la aplicación a estudiar. Los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente gráfica.

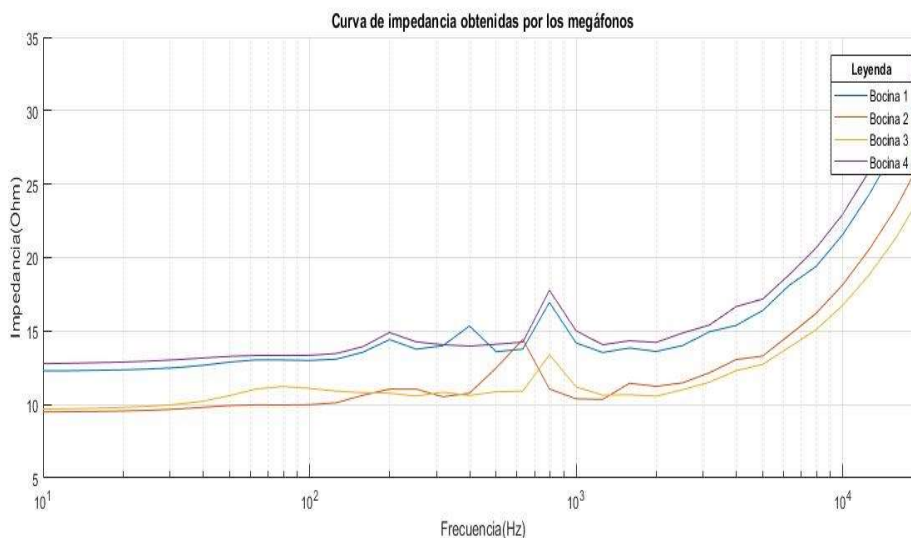


Figura 14: Curvas de impedancia obtenidas por los megáfonos mediante el software CLIO v10

Tal como se puede observar, la impedancia eléctrica medida con el multímetro se asemeja con la impedancia a frecuencia cero, que equivale al nivel de continua. El valor de impedancia máxima se puede observar en el rango entre 500-900 Hz, donde se aprecian unos picos en el valor de impedancia. Con la ayuda del fichero de texto que se extrae del software CLIO, se puede concretar esos valores, los cuales quedan reflejados en la siguiente tabla.

Nº megáfono	Frecuencia de resonancia(Hz)	Impedancia máxima(Ω)
1	794.33	17.77
2	630.96	14.43
3	794.33	13.39
4	794.33	16.95

Tabla 2: Impedancias máxima y frecuencias de resonancia de los megáfonos

La frecuencia a la que se obtiene una impedancia máxima se conoce como frecuencia de resonancia del altavoz, y es la frecuencia a partir de la cual el altavoz empieza a trabajar correctamente. Analizando los resultados, se puede observar donde, mayoritariamente, la frecuencia de resonancia se encuentra en torno a los 800 Hz, a excepción del megáfono 2. Una falta de uso, o una posible exposición a un gran estrés ha podido afectar al funcionamiento del altavoz en cierta medida, alterando parámetros ligeramente tales como la frecuencia de resonancia.

3.2.3 Respuesta en frecuencia

Para medir la respuesta en frecuencia de las bocinas, se ha procedido a realizar las medidas en la cámara anecoica del Campus de Gandía de la Universitat Politècnica de València. Esta cámara está diseñada para absorber todas las reflexiones de ondas acústicas, y además está completamente aislada de los ruidos del exterior.



Figura 15: Montaje para la medida de respuesta en frecuencia y directividad en cámara anecoica

Tal como se aprecia en la figura 15, se ha sujetado el megáfono al OUTLINE por medio de una base y unos ganchos, asegurándose de que quede bien centrado en cero grados respecto al micrófono de medida. El micrófono se ha situado a un metro de distancia de la fuente y centrado en altura con el centro de la bocina.

Mediante un cable de pinzas-SpeakON se han conectado las bocinas al generador de ruido y al amplificador de señal que se sitúan fuera de la cámara anecoica, por el cual se enviará una señal de ruido rosa.

El ruido rosa se trata de un tipo de ruido caracterizado por una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que todas las bandas de octava tienen el mismo nivel sonoro. Se trata del ruido utilizado para analizar todo tipo de comportamiento acústico: salas, altavoces, equipos, etc.

Por otro lado, mediante un cable alargador, se ha conectado el micrófono de precisión al sonómetro. Se ha configurado el sonómetro 2250 de Bruel & Kjaer en el modo "Analizador de frecuencias avanzado", habiéndose configurado los parámetros de medida en cuestión, eligiendo una resolución en 1/3 octava, con un margen de 20 a 20 kHz en el espectro y con los resultados sin ningún tipo de ponderación aplicada. Además, se ha elegido un tiempo de medida de un minuto para apreciar mejor el efecto de las bajas frecuencias.

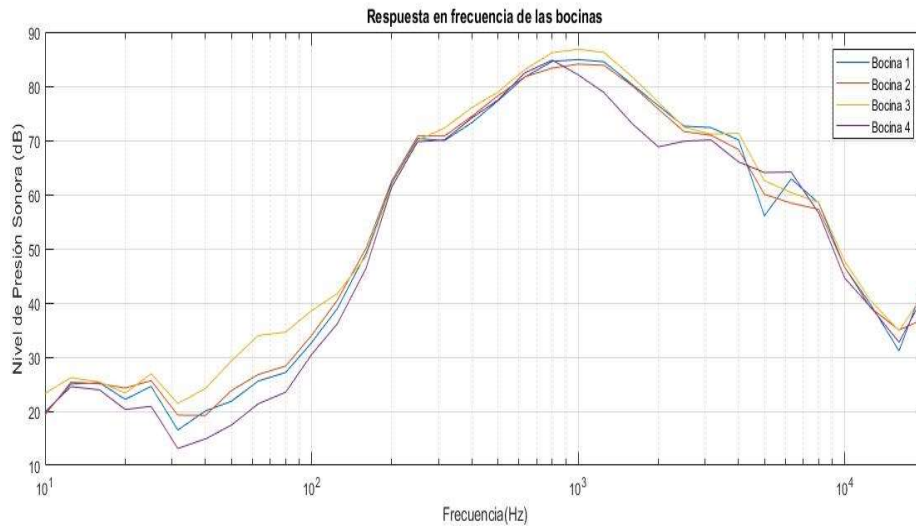


Figura 16: Gráfico comparativo de las respuestas en frecuencia de los cuatro megáfonos medidos en cámara anecoica

Tal y como se puede observar, la zona frecuencial donde las bocinas muestran un buen nivel de presión sonora se encuentra en el margen entre 500 Hz y 3 KHz. Este margen frecuencial es el clásico para la inteligibilidad de la voz. También cabe destacar que ya se presenta alguna disparidad entre las bocinas, que pese a ser del mismo modelo, presentan diferencias de nivel de presión en el margen de las frecuencias bajas, y alguna incluso en las zonas de interés del habla.

3.2.4 Diagrama de directividad

Como previamente se ha explicado, la base que sujeta el megáfono está anclada al motor OUTLINE. Se realizarán medidas de un minuto de duración girando el rotor de 5 en 5 grados, desde el origen hasta 180 grados. Luego, por simetría del altavoz, se obtendrán el resto de puntos de medida.

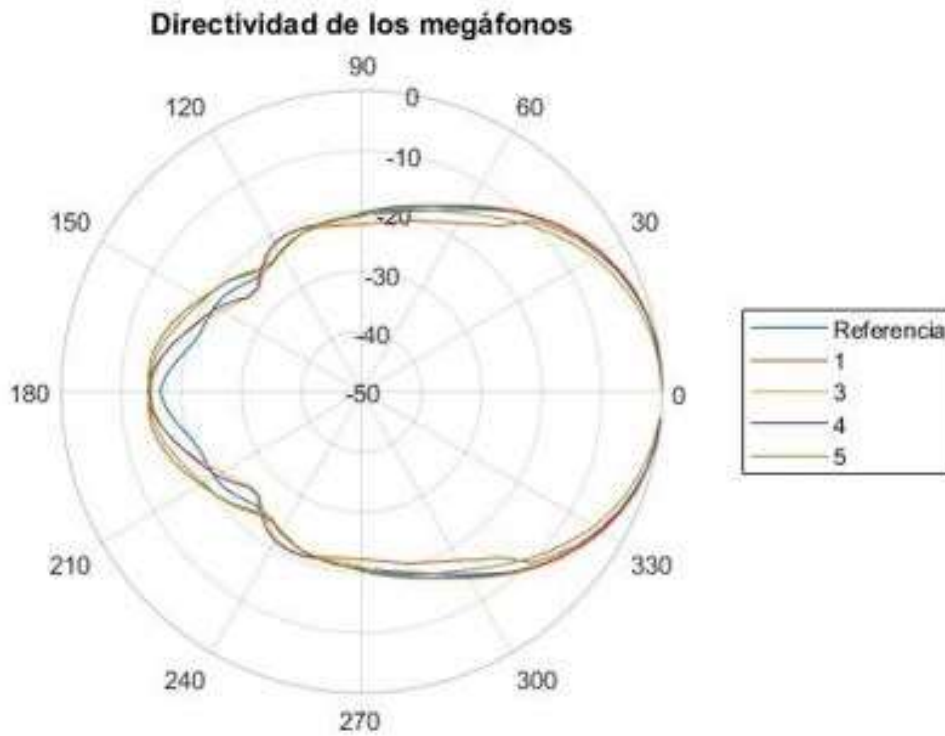


Figura 17: Gráfica comparativa de la directividad de los megáfonos medido en cámara para 1KHz

La anterior figura muestra el diagrama de directividad de las bocinas para 1 KHz de frecuencia. Tal como se puede observar los megáfonos presentan un comportamiento muy directivo debido al efecto de carga de la bocina, y que a su vez esta hace de guía de ondas, orientando el espectro a una dirección concreta.

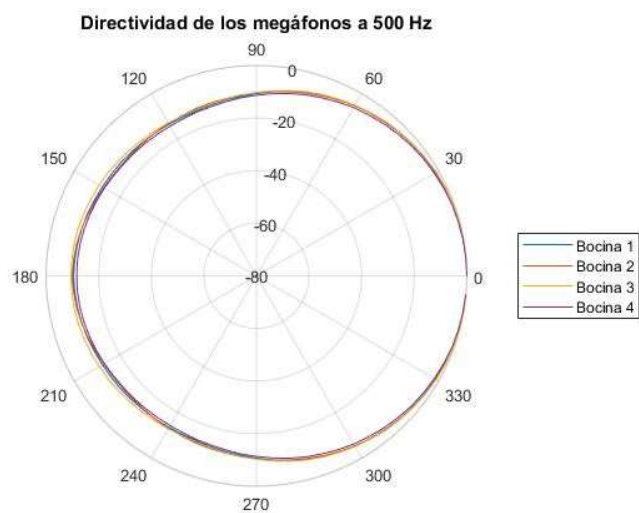


Figura 18: Directividad a 500 Hz

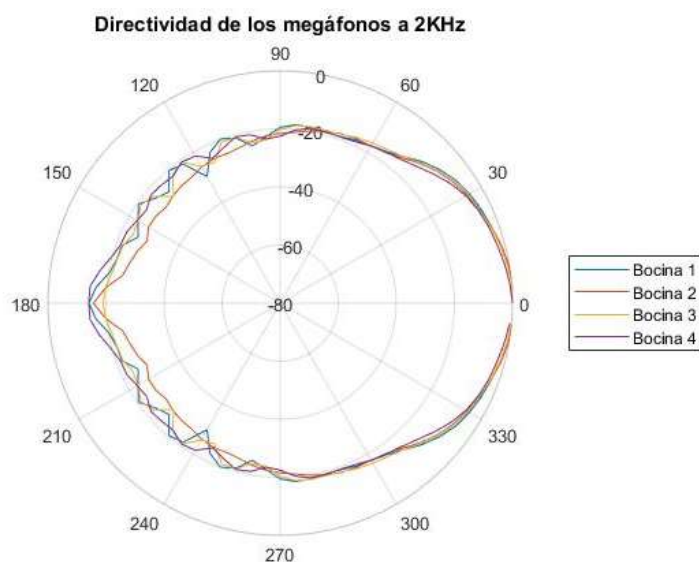


Figura 19: Directividad a 2 KHz

3.3 Simulación de los parámetros del Line-Array

Previamente a la construcción del Line-Array, y conociendo el comportamiento de las bocinas con las que se va a realizar el montaje, se ha procedido a realizar unas simulaciones para estudiar cuál se estima que sea el comportamiento.

3.3.1 Parámetros iniciales

Se han medido las bocinas, y tienen un diámetro $D=0,5$ m. Por lo que la agrupación lineal tendrá una longitud de $4D=2$ m. Para conocer el rango de frecuencias con una longitud de onda comparable al tamaño del Line-Array, donde se pueda un obtener un acoplamiento eficaz y, por tanto, una suma coherente de las ondas acústicas, se utilizará la expresión del apartado 2.3.3.1 del presente documento:

$$d \leq \frac{\lambda}{2}$$
$$2 \leq \frac{\lambda}{2}; \lambda \geq 1; \text{ como } \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \frac{340}{f} \geq 1; f \geq 340 \text{ Hz}$$

Atendiendo a la teoría, se producirá un acoplamiento eficaz con una suma en fase del frente de ondas hasta alrededor de 340 Hz.

3.3.2 Simulación de la directividad

Para la realización de la simulación del comportamiento directivo de las bocinas en el eje horizontal, se ha empleado el software DIREC realizado por José Femenía Catalá en su proyecto fin de carrera, donde se calcula de modo teórico, los diagramas de directividad de una agrupación lineal de altavoces [15]. Cabe destacar que este tipo de software ofrece una aproximación a los valores de directividad que generaría una agrupación de altavoces electrodinámicos estándar, por lo que el efecto introducido por la bocina no se verá apreciado en la simulación.

Los parámetros a introducir en la simulación son los siguientes:

- Frecuencia:1000 Hz
- Separación entre fuentes (Distancia entre centros): 0,5 m
- Número de fuentes: 4 fuentes
- Tamaño de la agrupación r: 2 m

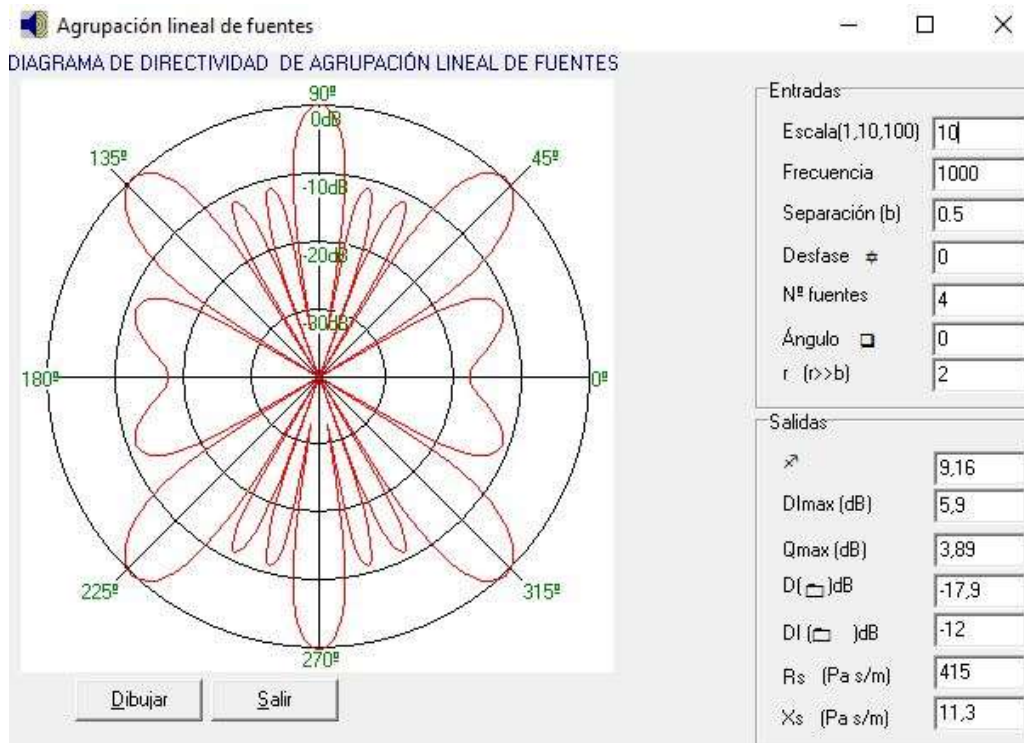


Figura 20: Directividad a 1KHz de la agrupación lineal de los 4 megáfonos

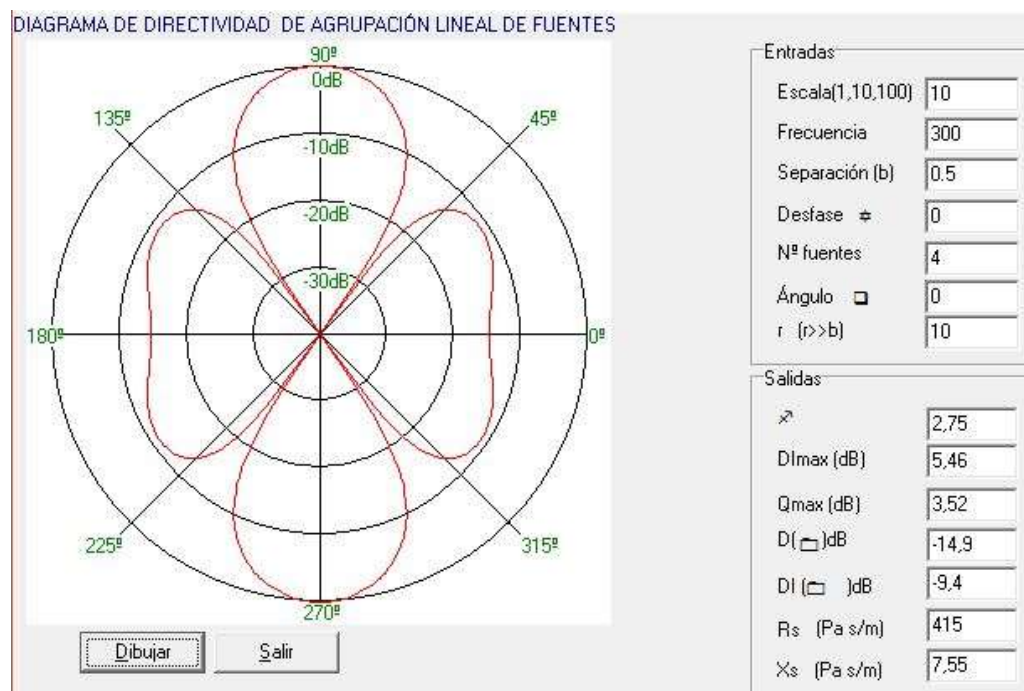


Figura 21: Directividad a 300 Hz de la agrupación lineal de los 4 megáfonos

Si se realiza una comparación entre las figuras 17 y 18, se puede observar como a baja frecuencia el comportamiento es mucho más omnidireccional que al subir la frecuencia.

3.4 Montaje experimental

Para el montaje, se ha fabricado una estructura simple para poder sujetar las cuatro bocinas en línea. Para ello, se han atornillado sobre una barra de madera de 2,5 m de longitud, y se le ha dado 50 cm de altura respecto del suelo con unas patas. El material fue adquirido hace años en la universidad y ha sido montado con la ayuda del técnico de laboratorio.



Figura 22: Construcción del Line-Array de megafonía

Una vez construida la estructura, se ha procedido al conexionado de los altavoces. Tal como se muestra en la Tabla 1, se dispone de dos altavoces con Impedancia 8Ω , y otros dos con 16Ω . Para poder conectarlos entregando el mismo nivel de señal a todas las bocinas, se ha realizado el conexionado tal y como se ve reflejado en la figura 20. Se conectarán en paralelo los megáfonos 1 y 4, y los megáfonos 2 y 3 en serie. Por simetría se han colocado las bocinas 1 y 4 en los extremos, y 2 y 3 en el centro de la agrupación lineal.

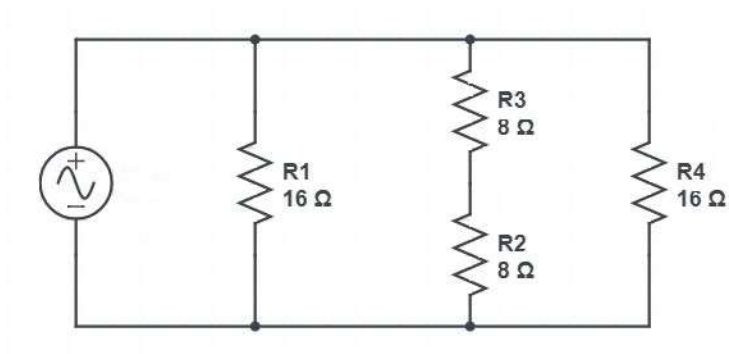


Figura 23: Esquema de conexionado de los altavoces

3.5 Medida en cámara anecoica del prototipo

Con el fin de estudiar si el prototipo creado ofrece alguna mejoría al sistema de megafonía en comparación a utilizar solo una bocina, se han realizado una serie medidas de respuesta en frecuencia del mismo modo que se ha procedido en el apartado 3.2.3 del presente trabajo. Para poder apreciar el efecto de caída del nivel de presión con la distancia, se han realizado cuatro medidas, a cada una aumentando en 1 metro la distancia al emisor.

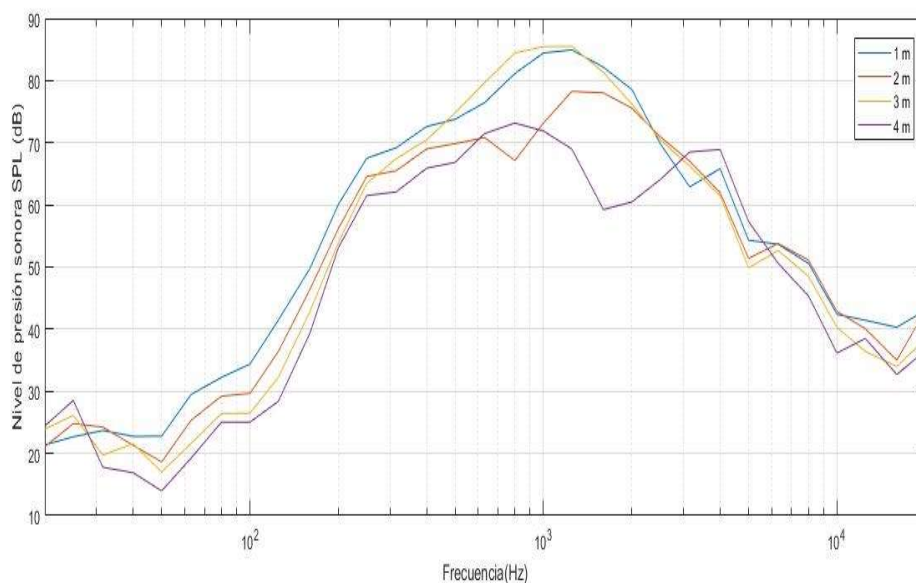


Figura 24: Respuesta en frecuencia del Line Array a distintas distancias

Como bien se ha explicado en el marco teórico, para que una agrupación lineal de altavoces presente una mejora respecto a una fuente puntual, la atenuación al doblar la distancia debe ser menor de 6 dB. En la siguiente tabla, se muestran los valores de las diferencias de niveles de presión para diferentes medidas, donde se puede comprobar tal efecto. El comportamiento será de fuente lineal cuando al doblar la distancia la caída sea de 3 dB (caso de 2 a 4 m). En los casos de 2 a 3 m esto se traduce en 1,8 dB de atenuación y de 3 a 4 m es de 1,2 dB de atenuación. Si el comportamiento fuese de fuente lineal, la doblar la distancia se atenuarían 6 dB (caso de 2 a 4 m). Para el salto de 2 a 3 m esto son 3,6 dB y para el salto de 3 a 4 m es de 2,4 dB. Estar por debajo de estos valores significa mejora respecto al comportamiento de fuente puntual.

f(Hz)	Nivel SPL2m-SPL3m(dB)	Nivel SPL3m-SPL4m (dB)	Nivel SPL2m-SPL4m(dB)
20	-2,8	-0,5	-3,3
25	-1,3	-2,4	-3,8
31,5	4,5	2	6,5
40	-0,3	4,7	4,4
50	1,6	3,1	4,7
63	3,7	2,4	6,1
80	2,8	1,4	4,2
100	3,2	1,4	4,6
125	4,2	3,9	8
160	3,5	3,5	7
200	2,3	0,8	3,1
250	1,1	2	3,1
315	-2	5,3	3,4
400	-1,5	4,6	3,1
500	-5	8	3
630	-8,8	8,2	-0,7
800	-17,3	11,3	-6
1000	-12,3	13,6	1,3
1250	-7,2	16,5	9,3
1600	-3,3	22,1	18,8
2000	-0,7	15,8	15,1
2500	0,5	6,4	6,9
3150	0,8	-2,3	-1,5
4000	0,5	-7,4	-7
5000	1,5	-7,4	-5,9
6300	1,1	2	3,2
8000	2,6	3,2	5,8
10000	2,6	4,1	6,7
12500	3,7	-2,1	1,6
16000	1	1,3	2,3
20000	4,6	1,8	6,4

Tabla 3: Valores de atenuación de la señal al aumentar la distancia.

A continuación, se muestra la gráfica del salto de 2 a 4 m.

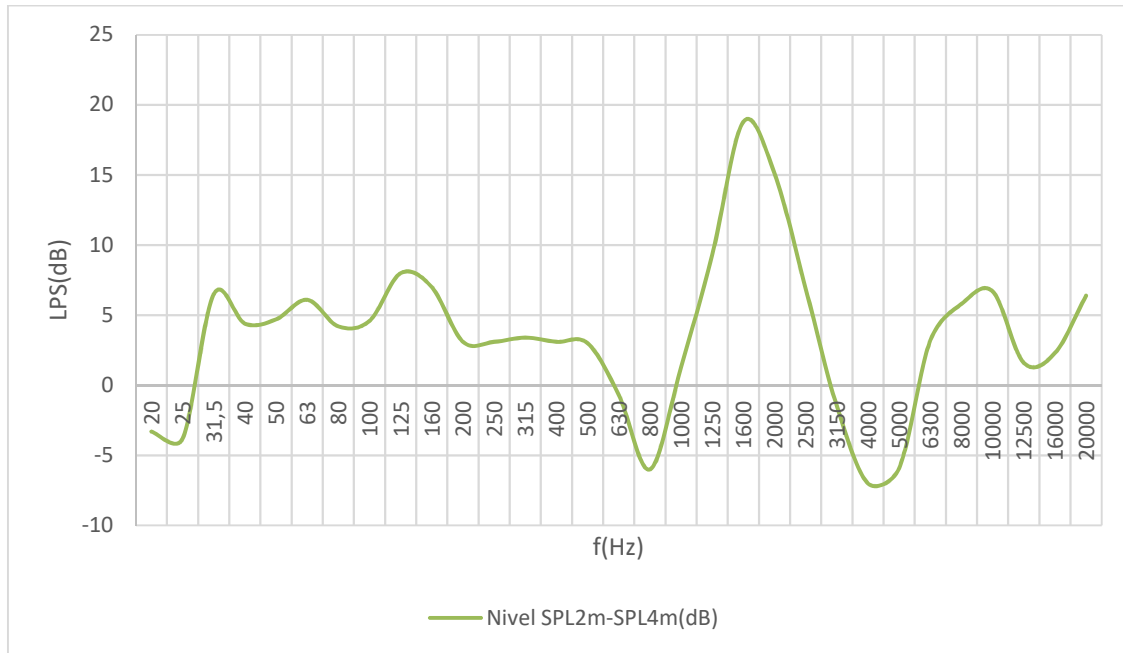


Figura 25: Gráfico de atenuación al doblar la distancia a la fuente lineal.

En primer lugar, al observar en la figura 25, si se comparan las medidas tomadas a 2 y 4 metros de distancia, se ha medido que la atenuación por propagación es de alrededor de 3 dB para el margen de frecuencias entre 200 y 500 Hz. Esto significa que, concretamente en este rango del espectro, se tiene una suma coherente del frente de ondas, un acoplamiento eficaz. Por debajo de 200 Hz, tal y como se ve en la figura 21, la bocina no emite de forma coherente, y por lo tanto, no tiene interés. En el punto 3.3.1. se hizo un cálculo de la coherencia, que llevaba hasta 340 Hz el efecto de line-array. Sin embargo, puede verse que realmente se alarga este efecto hasta 500 Hz, a partir del cual el sistema ya no funciona como line-array y aparecen efectos de interferencias constructivas y destructivas dependientes de la distancia. Respecto a los valores negativos se pueden deber a varios factores. Un factor puede ser la distancia a la fuente. Al tratarse de una agrupación lineal con un tamaño total de 2 metros de longitud, es posible que realizar la medida a estas distancias no sea lo más adecuado para poder ver el efecto del Line Array en ciertas bandas de frecuencia, ya que no se asegura el campo lejano (estar a una distancia suficientemente grande respecto al tamaño de la fuente). Para saber si se está midiendo en campo cercano, o en campo lejano, se utilizará la expresión para calcular el límite entre ambos campos en un Line-Array.

$$D = \frac{h^2 f}{2c}$$

Donde h es la longitud del array(m) y c es la velocidad de propagación del sonido en el aire (340 m/s)

$$D = \frac{2^2 f}{2 * 340} = 0,0059f$$

Por consiguiente, estos serían los valores límite del campo cercano-campo lejano en función de las bandas de frecuencia.

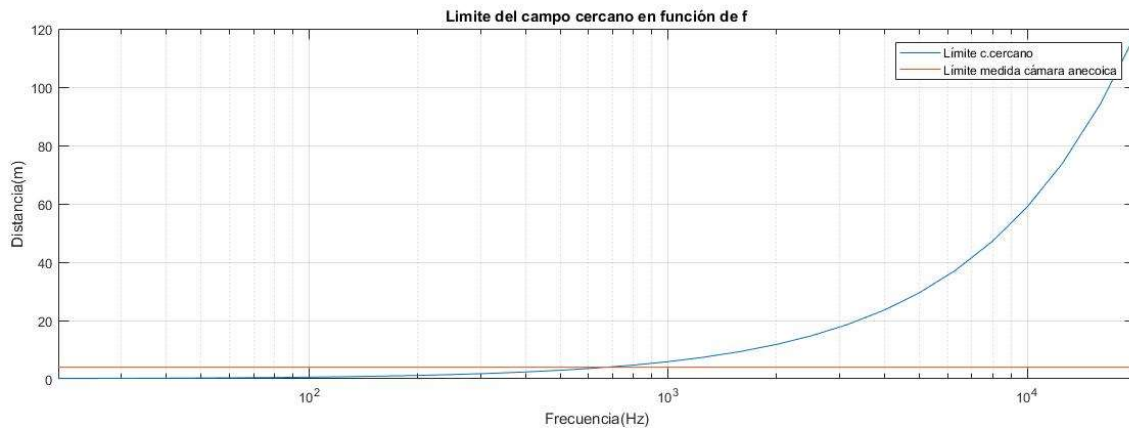


Figura 26: Límite del campo cercano en función de la frecuencia, comparado con la distancia máxima de medida

Tal y conforme se puede observar en la gráfica obtenida en la Figura 26, solo estamos midiendo en campo lejano hasta los 700 Hz, debido a las dimensiones de la cámara anecoica. Por ello, al medir frecuencias superiores a los 700 Hz, al estar por encima de la frecuencia límite para obtener acoplamiento eficaz (suma coherente del frente de ondas) y además tener medidas en campo cercano, se obtienen unos valores que no se corresponden con lo previsto teóricamente.

Otro factor posible de la aparición de dichos valores son posibles cambios que se hayan producido en la señal emisora que hayan podido alterar en cierta manera las medidas realizadas.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES DEL TRABAJO

4. CONCLUSIONES DEL EXPERIMENTO REALIZADO

Mediante la teoría del Line-Array, se ha procedido a fabricar una agrupación lineal a partir de cuatro megáfonos que había disponibles en el laboratorio del Campus de Gandia de la Universitat Politècnica de València. Se han caracterizado individualmente sus parámetros de impedancia, directividad y respuesta en frecuencia para entender su comportamiento. Una vez obtenidos sus parámetros individuales, se ha procedido a diseñar la estructura que sujetaría dichos megáfonos, así como su cableado.

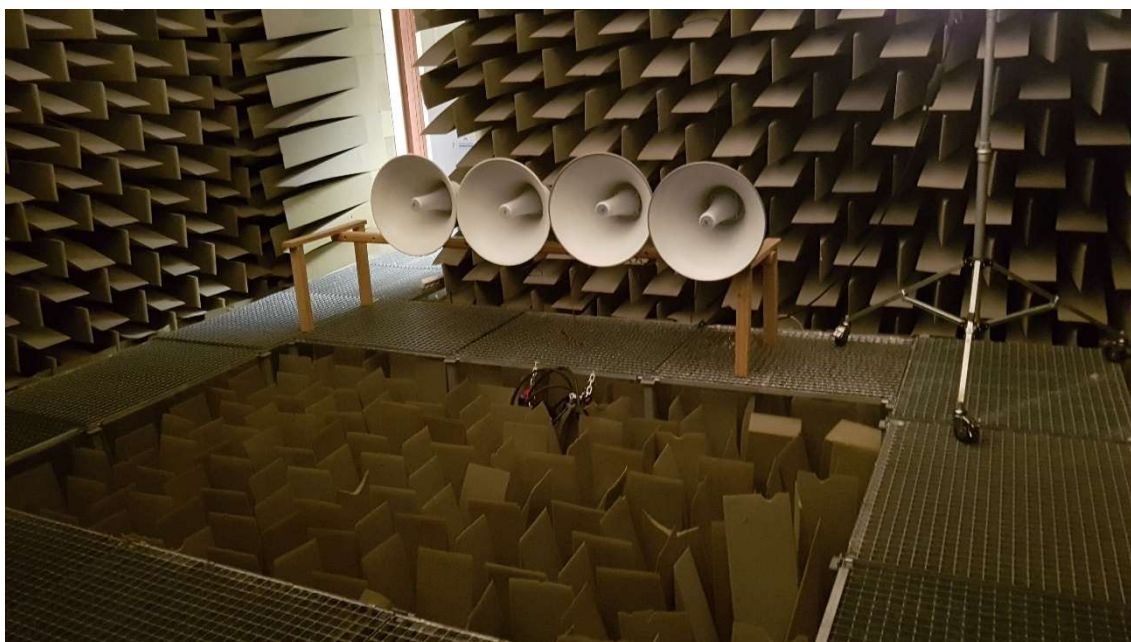


Figura 27: Prototipo del sistema Line-Array de megafonía para exteriores

Se ha estudiado y entendido cuales son los propósitos y beneficios de la construcción de este tipo de sistemas Line-Array, así como se ha medido sus niveles para comprobar si cambia la propagación de ser esférica a ser cilíndrica (fuente puntual – fuente lineal).

4.1 Propuestas de mejora

Viendo el resultado obtenido con el prototipo realizado, se proponen una serie de mejoras que ayudarían a optimizar el Line-Array.

En primer lugar, debido a que el diseño de la estructura inicialmente estaba planteado para albergar cinco megáfonos, en lugar de cuatro, excede en sus medidas, lo cual se podría haber optimizado. Así mismo, dicha estructura podría haber sido reforzada, haciendo el sistema más estable.

En cuanto a los parámetros de directividad, hubiera sido interesante poder haber realizado las medidas sobre la agrupación de megáfonos dispuestas en vertical, para comprobar su cobertura vertical, pero no ha sido posible por temas de infraestructura, así como las dimensiones de la cámara anecoica.

Otro factor también importante, es el hecho de que las bocinas de los megáfonos no eran exactamente iguales entre sí, si no que presentaban algunas diferencias en rugosidad, o falta de algunas gomas en la boca de la misma, lo cual afecta también a las medidas realizadas.

En futuros trabajos debe intentarse tener los mismos megáfonos con la misma impedancia (cosa que aquí no ha sido posible), y también buscar la manera de medir en campo libre de forma controlada. No es descartable realizar una instalación en exteriores para obtener a nivel comparativo el comportamiento del line-array y además, obtener valores absolutos del nivel de presión sonora en función de distancias grandes, tal y como es necesario en aplicaciones de megafonía.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Acoustics A.S.A.(1993) Beraneck L.L.
- [2] Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc. New York (1982)
- [3] El transductor dinámico. SPUPV(2002) Ramis J., Alba J., Martínez J., y Espinos V.
- [4] “Estudio de las características directivas mediante programas de simulación” Jesús Alba Fernández, Jaime Ramis Soriano
- [5]https://documentop.com/todo-sobre-el-line-array_598d77d31723dd1a9bbc74cd.html
Visitado el 28/11/2017
- [6] “Guía de ondas acústicas(Bocinas):Generalidades” Joaquín Castillo y Alejandro Costa, Junio 2012
- [7] “Arreglos lineales de fuentes sonoras” Cristian D,Carrizo;Jose S,Melian y Guillermo Stettler, Junio 2011
- [8] Apuntes de la asignatura “ Transductores e instrumentación acústica “ de Jesús Alba, PoliformaT
- [9] “Line Arrays: Theroy, Fact and Myth” Meyer Sound INC
- [10] “Funcionamiento de un Line-Array”, Joan La Roda, Ingeniero de Audio de D.A.S.
- [11] UNE-EN 60268-5:2004. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces
- [12] UNE-EN 60268-5:2004/A1:2011. Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 5: Altavoces
- [13] Olson H. Acoustical engineering , D. Van Nostrand Co., New York 1967
- [14] Davis D. Y C. Sound System Engineering, Howard W. Sams and Con, Seg. Edición.
- [15] Estudio sobre las características directivas de diferentes transductores acústicos emisores y receptores. Proyecto final de Carrera. UPV. Femenia Catalá, Jose, 02/05/
- [16] Marcel Urban, Christian Heil, Paul Bauman,“Wavefront Sculpture technology”,
- [17] J. Audio Eng. Soc., Vol. 51, No 10, 2003
- [18] Martin Colloms , High Performance Loudspeakers. Ed. Pentech Press 1982.
- [19] “Ingeniería Acústica” Harry Olson, 1952.
- [20] M. Recuero, Ingeniería Acústica.
- [21] Thiele, A.N., Loudspeakers in vented boxes.
- [22] Small, R.H., Simplified loudspeakers measurements at low frecuencies
- [23] Manual de funcionamiento del Clio v10 <http://www.audiomatica.com/wp/wp-content/uploads/clioman10.pdf> Visitado el 04/12/2017

CAPÍTULO 6. ANEXOS

REFLEX HORN SPEAKERS

TC-615/TC-615M



TC-630/TC-630M



DESCRIPTION

TOA's TC Series Reflex Horn Speakers are designed for both indoor and outdoor paging applications, as well as for background music reproduction. The lineup includes four models rated at 15W (TC-615 and TC-615M) and 30W (TC-630 and TC-630M). The "M"-type models are designed for use in high-impedance (70V/100V lines) systems and standard models for low-impedance (TC-615/8 Ω , TC-630/16 Ω) systems. This wide product lineup permits selection of the ideal speaker for most applications.

TC Series speakers feature newly developed diaphragms employing special heat-resistant fibers impregnated with phenolic resin to prevent the diaphragm from absorbing moisture and changing shape. High speaker efficiency has also been realized by minimizing the gap produced when the diaphragm bobbin is installed in the magnetic circuitry slit. The aluminum foil bobbin also features excellent heat dissipation properties to resist high power inputs and ensure high speaker durability.

All speakers are designed to ensure high speech clarity and sound quality suitable for music reproduction.

All external hardware (screws, bolts, nuts) are made of stainless steel, and the mounting bracket and the horn itself are treated with 50-micron thick powder paint coating which is about three times thicker than that of the conventional horns. All of these factors combine to ensure the speaker's excellent weatherproofing and corrosion resistance. In addition, the external horn flare is made of aluminum that is more shock-resistant than resin.

High-impedance models are equipped with an input impedance selector switch (4 steps for 100V line, and 5 steps for 70V line) which facilitates the ease of impedance settings without requiring disassembly. The switch is also equipped with an OFF position to prevent speaker damage resulting from incorrect impedance setting.

FEATURES

- Both high-impedance (70V/100V lines) models and low-impedance (8 Ω /15W model, 16 Ω /30W model) models available.
- Two power ratings: 15W and 30W.
- Stainless steel hardware (screws, bolts, nuts), and powder-coated horn and bracket ensure superb weatherproofing and corrosion-resistance.
- Shock-resistant aluminum round horn.
- Panel-mounted input impedance selector on high-impedance models facilitates the ease of input impedance matching.
- Unobtrusive two-tone colors (off-white horn corresponding to RAL 9010 and gray driver unit corresponding to RAL7042) helps speakers blend into surroundings.
- Compliance with IP65.