



## DISEÑO ELECTROACÚSTICO DE SISTEMA DE ALTAVOCES PARA MEGAFONÍA

G. Moreira Leyton.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Ingeniero en sonido. Santiago, Chile, 2010. [germanmoreira04@gmail.com](mailto:germanmoreira04@gmail.com)*

**RESUMEN:** En este trabajo se realiza el desarrollo de una caja acústica (altavoz) para uso en megafonía de grandes recintos. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan varios criterios para construcción de cajas acústicas, como las recomendaciones de Thiele-Small, para estudio de altavoces y recintos acústicos, más el resultado de varios trabajos empíricos relacionados. Se establecen criterios de uso, diseño y rendimiento electroacústico esperable, específicamente para parámetros como respuesta de frecuencia, nivel de presión sonora y cobertura. En este trabajo se entregan las especificaciones, condiciones eléctricas y electroacústicas, modelación computacional y recomendaciones generales.

**ABSTRACT:** In this paper the development of a loudspeaker for use in large enclosures PA is performed. For the development of this work several criteria for construction of loudspeakers, as the recommendations of Thiele-Small to study loudspeakers and acoustic enclosures, plus the result of several empirical studies related are used. Criteria for use, design and expected performance electroacoustic set specifically for parameters like frequency response, sound pressure level and coverage. In this paper specifications, electrical conditions and electroacoustics computational modeling and general recommendations are delivered.

**KEYWORDS:** diseño de altavoces, cajas acústicas, electroacústica, megafonía, parámetros Thiele - Small.

# 1. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista del diseño y estudio de altavoces y cajas acústicas, una de las metodologías más usadas actualmente es la propuesta por Neville Thiele y Richard Small, quienes a través de la simplificación de todos los parámetros electro –mecano-acústicos conocidos establecieron un método más simple para medir, calcular y modelar el comportamiento que finalmente deberá tener un altavoz en su correspondiente recinto.

La resolución de la analogía es un método para entender el fenómeno físico de los altavoces, sin embargo es un método muy teórico. Previo a la aparición de los parámetros Thiele - Small (T-S), la resolución de los circuitos era una operación muy compleja, pues influyen factores tales como compliancia, resistencia, masa mecánica, factor de fuerza, generador de voltaje, entre otros.

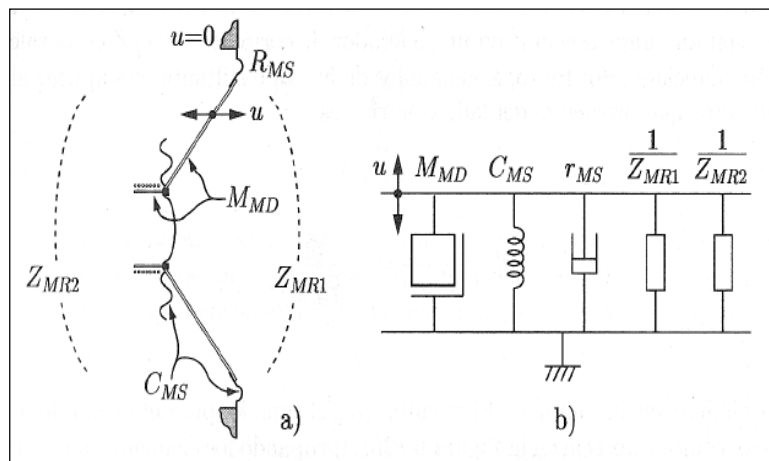


Imagen 1.- Esquema y diagrama mecánico de un altavoz.

Pero con el método de T-S se reduce a determinar cinco parámetros: frecuencia de resonancia ( $F_s$ ), factor de calidad mecánica (QMS), factor de calidad eléctrica (QES), factor de calidad total (QTS) a partir de la curva de impedancia eléctrica y elasticidad de la suspensión del altavoz, expresada como un volumen de aire equivalente (VAS), que permiten modelar la caja acústica en función de las características de los altavoces, independiente si el recinto será cerrado, abierto, pasa – banda, línea de transmisión acústica, etc. Todos estos datos tienen validez teórico- práctica en baja frecuencia ya que en este rango el modelo mecánico del altavoz actúa análogamente a un pistón y además son válidos en baja señal eléctrica (1 watt).

Los parámetros en alta señal (PAR, PER,  $X_{max}$ ), son obviados en este trabajo pues escapa a los alcances del diseño de este proyecto, además los fabricantes de los altavoces utilizados entregan los valores de potencia eléctrica máximos para sus productos.

Los modelos matemáticos que permiten determinar la respuesta del altavoz (función de transferencia) en el interior del recinto acústico son fundamentales, pues entrega una aproximación al comportamiento de la caja y permiten realizar los ajustes que sean requeridos al diseño, que finalmente busca obtener los mejores resultados de acuerdo a las necesidades técnicas que debe suplir el sistema.

## 2. OBJETIVOS

- Conseguir un diseño de caja acústica que sea lo más versátil para aplicaciones de megafonía.
- Los diseños deben ser probados tanto con proceso de cálculos específicos en el diseño de cajas acústicas y contrastados con software dedicado.
- Los parámetros electroacústicos deben ser los más óptimos posibles en cuanto a máximo nivel de presión sonora, respuesta de frecuencia extendida, eficiencia en baja frecuencia (para reproducción de programas musicales), criterios de conexión versátiles en sus circuitos y la capacidad de trabajar tanto en conexiones de baja y alta impedancia.

## 3. DESARROLLO

### 3.1.- Medición de Parámetros Thiele – Small

El criterio de diseño de cajas acústicas elegido fue el método tradicional propuesto por el Dr. Richard Small, por lo tanto se configuro un sistema de mediciones que conociendo los datos de voltaje y corriente de un circuito se pueda conocer la impedancia de este, situación que es análoga para un altavoz.

La mayoría de los parámetros Thiele – Small (TS) de un altavoz pueden obtenerse conociendo su curva de impedancia y para esto se implementó un método de medición consistente en un circuito de corriente constante y con procesamiento de datos en una aplicación del software MATLAB, llamada SMCA (sistema de medición de componentes de altavoces). Este método tiene la ventaja de realizar mediciones muy rápidas, con una señal de prueba tipo “sweep” con respuesta de frecuencia de 20 – 20000 Hz.

Para la medición de los parámetros T-S se generan barridos tipo sweep con la aplicación de MATLAB, la cual entrega los valores electro-mecano-acústicos del componente (Fs, QTS, QMS, QES, Vas). El altavoz medido es un componente PENTON SP816 TCO.

Los valores de parámetros TS obtenidos para el altavoz PENTON, en baja señal eléctrica son los siguientes:

<b>Fs</b>	89	Hz
<b>QMS</b>	18	Adim
<b>QES</b>	0,54	Adim
<b>QTS</b>	0,52	Adim
<b>VAS</b>	18	L

*Tabla 1.- Parámetros de T-S medidos en laboratorio.*

### 3.2.- Diseño del Prototipo

De acuerdo a los requerimientos de diseño, es necesario que el sistema de altavoces cumpla con la capacidad de generar altos niveles de presión sonora (SPL), alta eficiencia de directividad (altavoz será usado en recintos de gran tamaño) y además no debe ser de tamaño superior a los sistemas de parlantes que se utilizan es este tipo de sonorizaciones (arreglo de altavoces tipo “racimo”).

### 3.3.- Modelación del Recinto Acústico

Por las razones anteriormente expuestas, la propuesta consiste en una pirámide truncada invertida, con componente PENTON en parte inferior sumada a 4 altavoces en cada una de las caras laterales de la pirámide.

Una vez definido este asunto, se comenzó con la modelación, que se realizó en los softwares BASS BOX PRO (diseño de caja acústica) y WIN ISD (función de transferencia y respuesta del altavoz), que permiten una gran versatilidad en el diseño de recintos acústicos, y se pueden considerar casi todas las variables y parámetros de los altavoces y componentes eléctricos que constituyen estos sistemas.

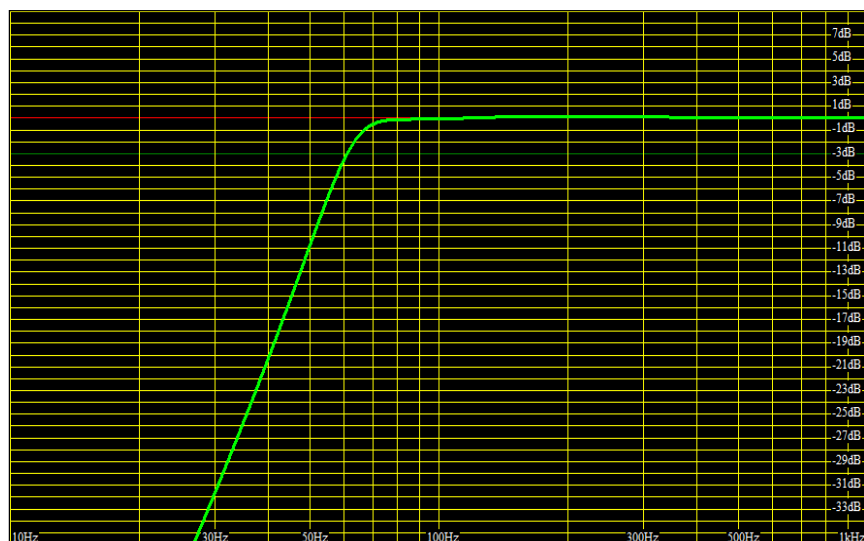


Imagen 2.- Función de Transferencia del Altavoz en Caja Bass Reflex (Win ISD).

Una vez obtenida la función de transferencia, que entrega la respuesta de frecuencia del altavoz, se modeló el diseño y dimensiones que tendrá el recinto, obteniendo los siguientes resultados:

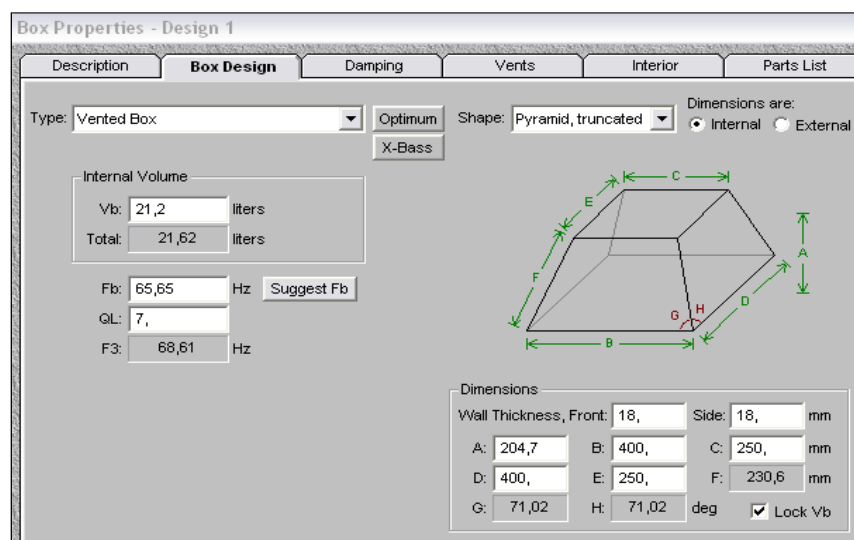


Imagen 3.- Dimensiones de diseño del recinto acústico.

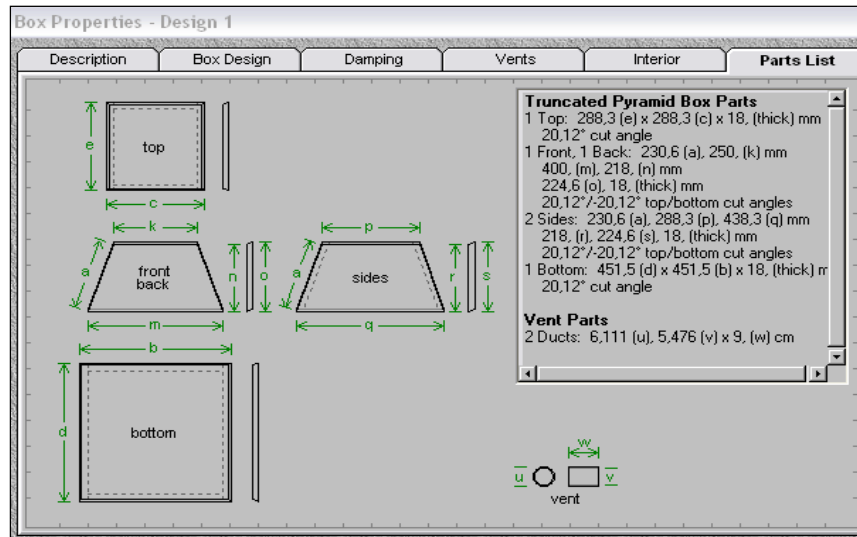


Imagen 4.- Características constructivas del recinto acústico.

Las dimensiones que entrega el software de acuerdo a los valores T-S del componente, son de un recinto de moderadas dimensiones, debido al ajuste correspondiente a un valor (QL: 7) acorde a las necesidades de instalación, por lo que este ítem esta optimo, y el diseño piramidal se muestra estéticamente atractivo para usos en centros comerciales que no necesiten elementos que deterioren los conceptos visuales.

Para mejorar la respuesta en baja frecuencia del sistema, es necesario el uso de reflectores de bajos, los que deben tener una frecuencia de sintonización que no altere el comportamiento del diseño. Este proceso se optimiza usando las opciones que ofrece Bass Box. Las dimensiones de los ductos, consideran las correcciones por extremo que aparecen en la figura anterior. La colocación de estos es en la parte superior de la caja; ya que en este lugar son más fáciles de implementar, no entorpecen la estética y si el sistema está colgado muy cercano al techo se genera un refuerzo adicional de frecuencias bajas. Otro factor que favorece el comportamiento del recinto, es el uso de material absorbente, ya que tiene dos ventajas muy importantes, que son minimizar la aparición de modos normales de vibración en el interior de la caja, y añade un refuerzo adicional en baja frecuencia, provocando una respuesta más plana dentro de este rango frecuencial. La cantidad de material absorbente simulada es de un 40% del volumen interior. Considerando estos factores, la modelación entrega los valores de nivel de presión sonora máximo del sistema, más la curva de impedancia para el conjunto altavoz + recinto.

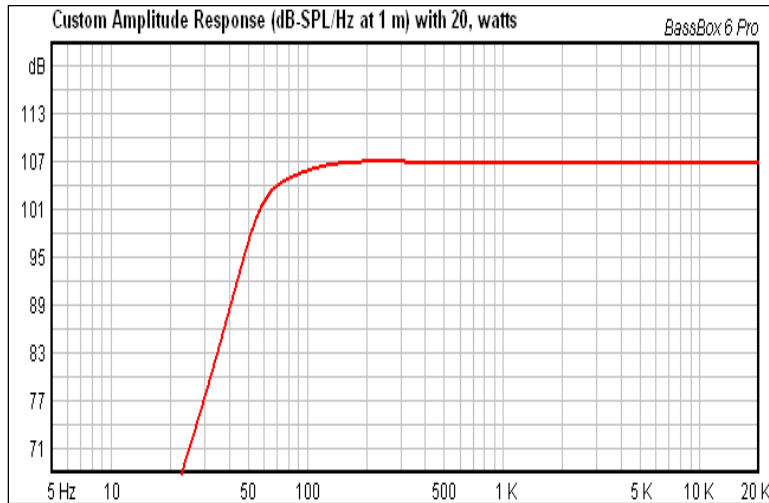


Imagen 5.- Predicción de Máximo nivel de presión sonora para el sistema de altavoz + recinto.

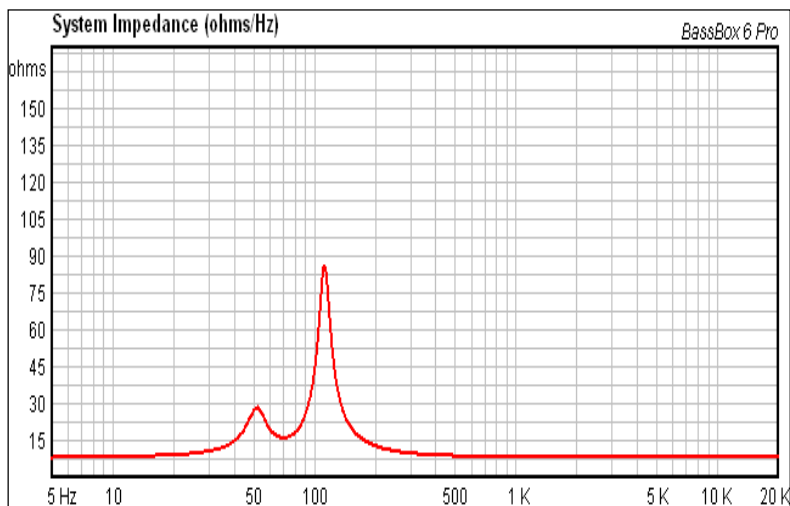


Imagen 6.- Predicción de respuesta de impedancia de sistema de altavoz + recinto.

Es necesario mencionar, que en el gráfico de la respuesta de impedancia solo aparece la frecuencia de resonancia del reflector de bajos, la del componente PENTON y el resto del recinto, sin considerar los altavoces que están alojados en las caras laterales, ya que éstos son despreciables respecto del cálculo del volumen del recinto, por lo que solo se considera en las mediciones realizadas in-situ en el prototipo definitivo.

Las ventajas que tiene un diseño de este tipo es que gracias a la caja, mejora la respuesta en baja frecuencia del sistema, además de un aumento teórico de al menos 2 dB de NPS producto del recinto. Existe baja cancelación de frecuencias por corto circuito acústico; ya que el altavoz no comparte la caja con otros componentes similares y los equipos de alta frecuencia tienen un efecto minoritario sobre los resultados en este ítem. La cobertura estimada de este sistema es de 360° (horizontal) x 180° (vertical).

El componente seleccionado para las caras laterales son tweeters, ya que éstos tienen un alto rendimiento, necesitan baja potencia eléctrica, son muy direccionales y son capaces de sonorizar a gran distancia.

El tweeter es el modelo TECH SPT-344, que según sus especificaciones cumple con los requisitos descritos anteriormente. No es necesario determinar los parámetros electro-mecano-acústicos de estos componentes pues son despreciables en términos de cálculo del volumen interno del recinto del altavoz.

### 3.4.- Conexión Eléctrica

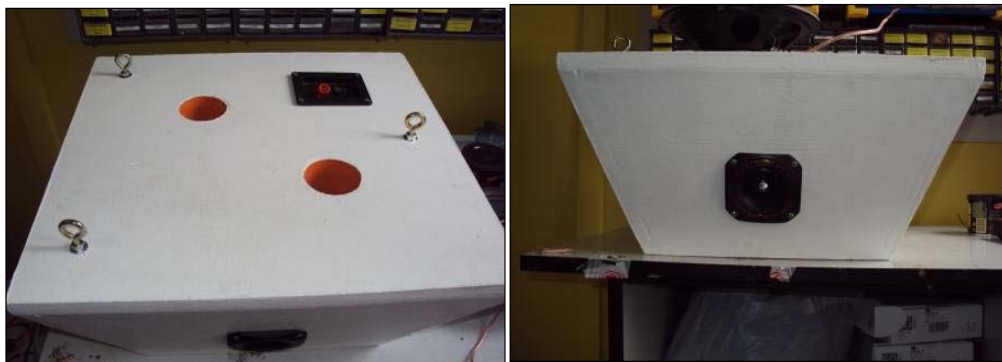
La conexión eléctrica entre el amplificador y los altavoces fue pensada para utilización en baja impedancia, ya que es la más común. En caso de ser necesario puede implementarse un sistema de transformadores para uso en sistemas de voltaje constante o alta impedancia, habitual en instalaciones de megafonía.

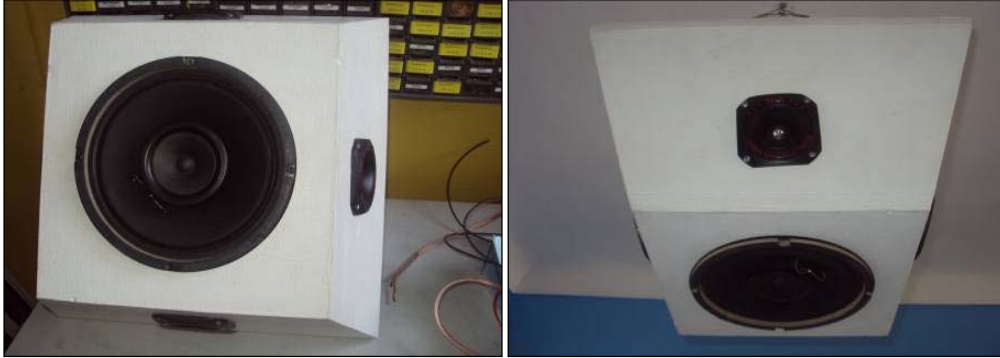
La conexión entre los tweeters es una combinación de serie – paralelo, por lo que la impedancia nominal vista por el amplificador es de  $8 [\Omega]$ , al añadir el componente PENTON. El tipo de cable utilizado es de protección de PVC flexible con dos polaridades, de grosor de  $4 [\text{mm}]$  que muestra un buen rendimiento en las mediciones que realicé en laboratorio en lo respecta a las pérdidas, por lo que la distribución de potencia a cada altavoz es la misma.

La conexión es en paralelo entre los tweeters y el altavoz de rango completo, por lo tanto la impedancia nominal vista desde el amplificador se mantiene en  $8 [\Omega]$ .

## 4.- CONSTRUCCIÓN DE RECINTO ACÚSTICO

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, y considerando el diseño propuesto en Bass Box la construcción del altavoz fue la siguiente.

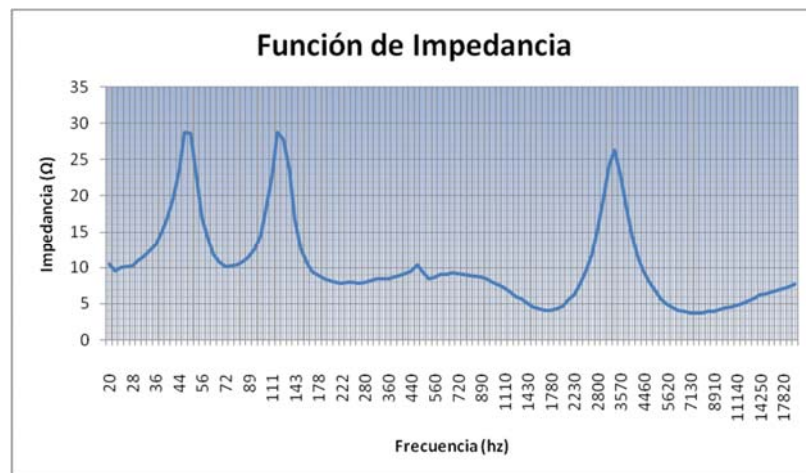




*Imagen 7,8,9,10.- Vistas del altavoz construido.*

## 5.- PRUEBAS Y ANÁLISIS

### 5.1.- Impedancia



*Imagen 11.- Medición de impedancia eléctrica del sistema altavoz + recinto.*

Un dato importante que entrega esta medición y que demuestra que la etapa de diseño fue correcta, es que coincidieron las frecuencias de resonancia (peaks en el gráfico) predichas en software con las que finalmente tiene el sistema una vez construido. Estas frecuencias de resonancia mecánicas indican el punto de máxima excursión de los altavoces y el reflector de bajos, entregando una información muy útil respecto de cómo se comporta mecánicamente el altavoz a esas frecuencias y como se acopla con un amplificador. Es necesario considerar que si bien las frecuencias de resonancia coinciden, los valores obtenidos en la medición son más altos que en la predicción computacional. Es posible que esto se deba a condiciones constructivas del recinto acústico, o limitaciones del método de cálculo pero no se realizó un análisis específico de este resultado.



## 5.2.- Respuesta de Frecuencia

El esquema de medición no es el habitual para estos usos, ya que ciertas condiciones técnicas para las mediciones no estuvieron disponibles como las siguientes:

- Ausencia de cámara anecoica.
- Nivel de ruido de fondo superior al ideal de medición.
- Falta de un criterio definitivo para altavoces con una configuración como ésta, pues este sistema tiene una cobertura de 360° horizontal X 180° vertical, lo que implica la aplicación de un método específico.

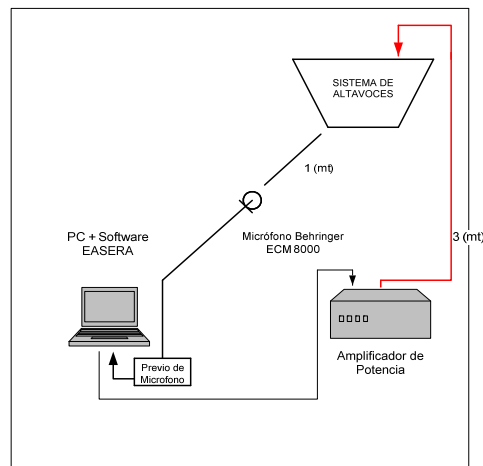


Imagen 12.- Esquema de Medición de Respuesta de Frecuencia

Para la medición se estableció solo una posición de micrófono, en un punto que recibe señal desde las caras laterales y el componente principal alojado en la cara inferior, a 1 metro de distancia, tal como aparece en el esquema.

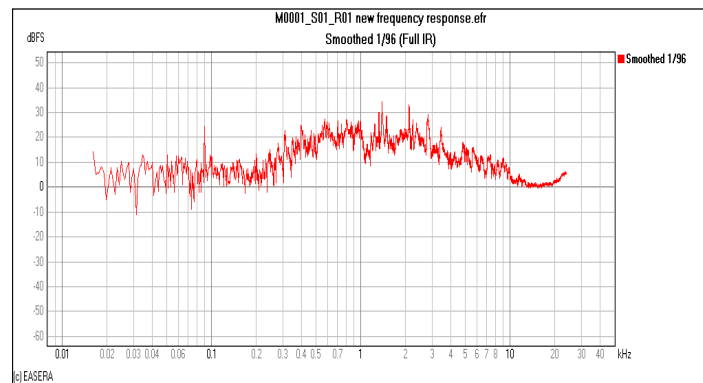


Imagen 13.- Respuesta de frecuencia medida del sistema de altavoces final.

Esta medición de respuesta de frecuencia no cumple con la metodología necesaria, pero sirve a modo de referencia. El análisis realizado por el software EASERA, que realiza una comparación entre la

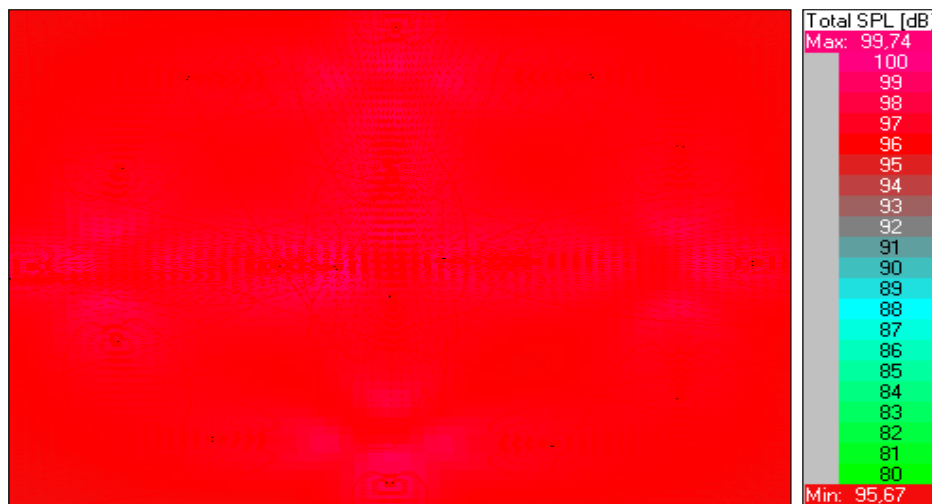
señal generada por el software (ruido rosa) y la señal entrante captada por el micrófono. La respuesta resultante muestra un realce en frecuencias donde se encuentra la inteligibilidad de la palabra (1000 hz – 4000 hz), factor muy importante y positivo para la finalidad que debe tener la caja.

### 5.3.- Modelo Computacional del Sistema de Altavoces

Para respaldar las capacidades de la caja acústica propuesta, se modeló una sala tipo en el programa EASE. A fin de predecir el comportamiento de los sistemas propuestos, se calculó su respuesta en condiciones de uso habituales y se tomaron ciertos supuestos para la modelación, como es el ruido de fondo, T30, tamaño de la sala y ubicación de altavoces. Las condiciones supuestas se extrajeron de bibliografía específica de la empresa SPEVI, que tiene un registro propio de las características de los locales donde instala sus equipos de sonorización, por lo que estos datos le dan mucha más validez a la modelación. El criterio para ruido de fondo fue suponer el peor caso. Otro supuesto de la modelación, es que los altavoces emitirán un NPS de 107 dB a máxima potencia RMS, en condiciones que gracias al diseño de la caja acústica debiera ser al menos 2 dB por sobre este valor. Se establece una colocación teórica de 5 sistemas ubicados en distintos puntos de la sala.

T30	1,5 (Seg) @ 2 khz.
Ruido de Fondo	85 dB (A)
Altura del Área de Cobertura	1,7 [mts]
Altura de Montaje de Altavoces	4,5 [mts]
Medidas de la Sala	60 X 60 X 5 [mts]

*Tabla 2.- Condiciones Acústicas de Modelación*



*Imagen 14.- Cobertura de nivel de presión sonora.*

El nivel de NPS obtenido en EASE con solo 5 sistemas alcanzó un promedio de 96,5 dB (@ 2 khz), valor que esta +10 dB por sobre el peor caso de ruido de fondo y que según literatura alcanza satisfactoriamente el valor donde una fuente puede enmascarar otra (8-10 dB), por lo que el confort, desde este punto de vista esta funcional a los requerimientos.

No se consideran en esta modelación los valores de inteligibilidad (%ALCONS, STI, RASTI) porque son propios de cada sala donde se instale el sistema y los alcances de este proyecto solo atañen a la caja acústica.

## 6.- CONCLUSIONES

Este diseño de recinto acústico para megafonía resultó adecuado considerando los objetivos propuestos, pues los parámetros electroacústicos requeridos se cumplieron, respecto de los modelos de predicción como de las mediciones realizadas, más importantes para este tipo de cajas acústicas, como la respuesta de frecuencia y la impedancia. Además el diseño del recinto resultó acorde al estándar habitual de dimensiones para altavoces instalados colgantes y lo más importante, más allá de consideraciones subjetivas, este tipo de diseño no es habitual y es un problema de ingeniería el tener soluciones adecuadas para sonorización de grandes espacios, y con mejor diseño, desarrollo y construcción se puede obtener un sistema mucho más eficiente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pueo, B., Romá, M. “*Electroacústica, altavoces y micrófonos*”, 1ra edición, Pearson Hall Ediciones (2003)
- [2] Dickason, V. “*Loudspeaker design cookbook*”, 7ed, Audio Amateur Press (2006).
- [3] Delaleu, C.H. “*Altavoces y cajas acústicas*”, 2da edición, Editorial Paraninfo (1996).
- [4] Cardenas, C. “*Introducción a la acústica*”, Ediciones Universidad Vicente Pérez Rosales (2002)
- [5] Ballou, G. “*Handbook for sound engineers*”. 4th edition, Focal Press (2008).
- [6] Eargle, J. “*Sound system design reference manual*”. JBL Technical notes (1999).
- [7] Cué, E. “*Apuntes de Electroacústica*”, Escuela de sonido, Santo Tomás (2006).
- [8] Barrera, A. “*Apuntes de Recintos para altavoces*”, Escuela de sonido, Santo Tomás, (2009).
- [9] Garrido, F. “*Procedimiento de medición de componentes de un altavoz mediante software*”, Universidad Tecnológica de Chile, (2008).
- [10] Small, R.H. “*Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis*”, J. Audio Eng. Soc., vol. 20, pp. 383–395 (June 1972)
- [11] Small, R.H. “*Vented-Box Loudspeaker Systems*”, J. Audio Eng. Soc., vol. 21, pp. 363–372 (June 1973); pp. 438–444 (July/Aug. 1973); pp. 549–554 (Sept. 1973); pp. 635–639 (Oct. 1973)
- [12] Thiele, N. “*Loudspeakers in Vented Boxes*”, Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Australia, 22(8), pp. 487-508. Reprinted in Journal of the Audio Engineering Society, (1971)