

## ESTUDIO DE LA RADIACIÓN EN BAJA FRECUENCIA DE LINEAS DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

PACS: 43.38.Ja

Pueo Ortega, Basilio; Romá Romero, Miguel  
Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Alicante  
03080 Alicante  
Telf. 965 903 400  
Correo-e: basilio@disc.ua.es; mroma@disc.ua.es

### ABSTRACT

Transmission Line Loudspeakers (TL) are open-back loudspeaker cabinets, in which the sound wave from the rear side of the speaker is channelled through a long pathway filled with a damping material. In a TL, very low frequencies exit the end of the tube, extending the low frequency response one third octave below the driver's resonance frequency. Unlike sealed and ported speaker systems, the transmission line system has never been completely and successfully modelled. In this study, a transmission line prototype for testing and measuring was fabricated to characterize the influence of the main performance parameters: line lengths or alignment frequencies, cross sectional areas and stuffing densities.

### RESUMEN

Las líneas de transmisión acústica (TL) son un tipo de caja acústica abierta, en la que la onda de presión generada en la parte posterior del diafragma viaja a través de un tubo relleno de material absorbente. En una línea de transmisión se produce una extensión en la respuesta en baja frecuencia de hasta un tercio de octava gracias a la radiación extra producida al final del tubo. En contraste a las cajas convencionales, las líneas de transmisión acústica no poseen un modelo matemático satisfactorio. En el presente estudio, se fabrica un prototipo para caracterizar la influencia de los principales parámetros que influyen en el comportamiento de la misma: la longitud de la línea o alternativamente, la frecuencia de resonancia, la sección del altavoz y línea y la densidad del material absorbente.

### INTRODUCCIÓN

El estudio profundo de cualquier dispositivo de carácter electroacústico debe considerar las dos fenomenologías asociadas. Por un lado, la impedancia eléctrica de entrada es fundamental en términos de acoplamiento eléctrico. El estudio tiene, además, un interés añadido puesto que los fenómenos acústicos que se producen en el medio se ven reflejados sobre la curva de impedancia eléctrica de entrada. Por otro lado, la perturbación producida en el medio por un sistema radiante se manifiesta en forma de variaciones de presión sonora. Considerando que las cajas acústicas son la última y más importante etapa dentro de la cadena de conversión electroacústica, se realiza un estudio de algunos de los factores físicos que intervienen en el

comportamiento de la impedancia eléctrica y de la presión sonora en un caso concreto de recinto acústico avanzado, la línea de transmisión acústica.

El comportamiento de cualquier sistema basado en la transducción de señales eléctricas en acústicas se describe mediante el estudio de los circuitos equivalentes propuestos inicialmente por Thiele [1] y Small [2] de altavoces en cajas cerradas y ventiladas. Los circuitos equivalentes se desarrollan a partir de los cuadripolos equivalentes del transductor en cuestión, en el que se distingue una entrada de carácter eléctrico y una salida de carácter mecánico-acústico. Reducido el cuadripolo a un transformador cuyo factor de transformación es definido por el transductor, es posible expresar dos circuitos equivalentes entre sí, y ambos descriptores del sistema del que fueron extraídos: el circuito equivalente eléctrico y el mecánico-acústico. La diferencia entre elementos mecánicos y acústicos es un factor constante denominado superficie útil del diafragma.

## LÍNEA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

Una línea de transmisión acústica es un sistema de radiación en baja frecuencia que consiste en un tubo relleno de material absorbente, de longitud suficientemente grande como para considerar que en su interior se produce propagación acústica (figura 1). La longitud de la misma se fija en  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda de la frecuencia de ajuste, que generalmente coincide con la de resonancia del altavoz, de modo que la radiación acústica al final del tubo se mezcla con la generada por el altavoz, aumentando la salida acústica en la zona de baja frecuencia. La principal diferencia respecto al resto de sistemas como las cajas cerradas o las ventiladas es que, dado que se trata de un sistema abierto, el diafragma puede moverse libremente, extendiendo la radiación en baja frecuencia hasta en un tercio de octava.

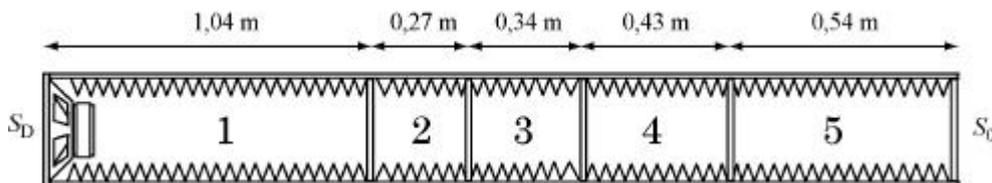


Figura 1. Línea de transmisión acústica modular.

### Circuito equivalente

La figura 2 muestra el circuito acústico equivalente de una línea de transmisión acústica con un transductor dinámico. Obsérvese cómo los elementos puramente eléctricos, es decir, el generador  $e_g$  y la resistencia interna  $R_g$  del equivalente de Thevenin del amplificador se han transferido al lado acústico mediante las siguientes transformaciones:

$$P_g = \frac{e_g B l}{S_D [(R_g + R_E) + j \omega L_E]} \quad R_{AE} = \frac{(B l)^2}{S_D^2 (R_g + R_E)} \quad C_{AE} = \frac{L_E S_D^2}{(B l)^2}$$

Los elementos acústicos del altavoz son  $R_{AS}$ ,  $M_{AS}$  y  $C_{AS}$ , resistencia, masa y compliancia acústica del diafragma, respectivamente. El último elemento, la impedancia acústica de la línea de transmisión  $Z_{AL}$ , describe cómo se opone el aire del interior de la línea a ser movido por la parte posterior del diafragma, de lo que se deduce la cantidad de potencia acústica y finalmente, presión, que es transferida al medio.

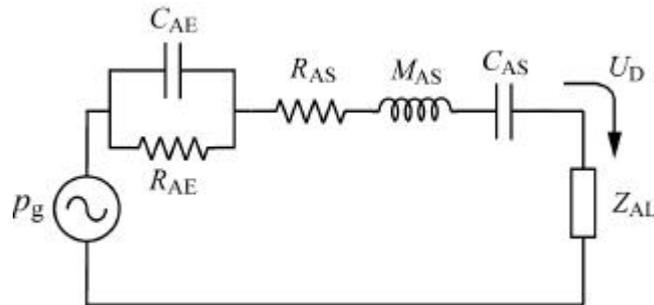


Figura 2. Circuito acústico equivalente de una línea de transmisión acústica.

El comportamiento se describe, pues, a partir de algún modelo teórico de  $Z_{AL}$ . Aunque en la actualidad ninguno de los modelos propuestos es ampliamente aceptado, es posible caracterizar el comportamiento de dicha impedancia de facto.

## PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se realizaron medidas en laboratorio del altavoz empleado en la línea, con el fin de determinar exactamente sus parámetros de Thiele/Small. A continuación, se fabricó un prototipo de línea de transmisión con módulos yuxtapuestos, cuyas longitudes están relacionadas armónicamente (figura 1) y corresponden a frecuencias de cuarto de onda de 32,7 Hz (frecuencia de resonancia del altavoz), 41,2 Hz, 51,9 Hz, 65,4 Hz y 82,4 Hz. Del mismo modo, el prototipo permite estudiar tres secciones de línea  $S_0$ :  $2,2S_D$ ,  $3S_D$  y  $5S_D$ , donde  $S_D$  es el área del diafragma y cinco densidades de empaquetamiento de material absorbente  $D$ : 0, 1,5, 3, 5 y  $8 \text{ kg/m}^3$ . Variando individualmente los parámetros expuestos y la combinación de ellos, se tomaron medidas de impedancia eléctrica vista en bornas del altavoz  $Z_{ee}$ , así como de nivel de presión sonora frontal y en el extremo opuesto de la línea o boca.

## RESULTADOS

A tenor de los resultados y antes de entrar en detalle, se observa que, para una longitud dada e independientemente de la sección de la línea, la posición de los mínimos en la curva de presión del altavoz coincide con las frecuencias impares de cuarto de onda. En la figura 3 aparece la posición de  $\lambda/4$ ,  $3\lambda/4$ ,  $5\lambda/4$  y  $7\lambda/4$  para una longitud de 2,62 m y relación entre secciones  $S_0/S_D$  de 2,2, 3 y 5, obteniendo una recta con coeficiente de regresión de prácticamente la unidad.

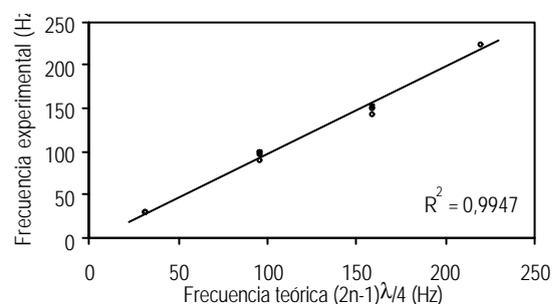


Figura 3. Frecuencias experimentales de mínimos de presión sonora frente a frecuencias impares de cuarto de onda.

## Frecuencia de ajuste

En teoría, sintonizar una línea a su frecuencia  $\lambda/4$  es elegir una longitud cuatro veces menor que la asociada a la resonancia mecánica del altavoz que aloja. Sin embargo, con el fin de evaluar el comportamiento de la misma cuando la longitud es menor, se fueron restando longitudes de tal modo que entre una longitud y la anterior, existiese una diferencia de un tercio de octava en sus frecuencias de ajuste.

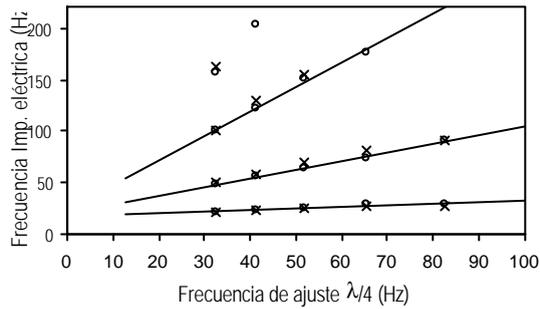


Figura 4. Frecuencias experimentales de máximos de impedancia eléctrica frente a frecuencias calculadas de cuarto de onda ( $\rho$   $2,2S_D$ ,  $\epsilon$   $5S_D$ ).

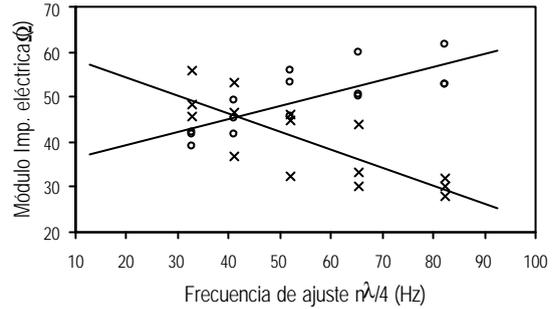


Figura 5. Módulos experimentales de máximos de impedancia eléctrica frente a frecuencias calculadas de cuarto de onda (O altavoz,  $\epsilon$  modo  $\lambda/4$ ).

Como se aprecia en la figura 4, existe una gran linealidad entre las frecuencias teóricas de cuarto de onda para las cinco longitudes bajo prueba y la posición de los máximos de impedancia eléctrica. A medida que la línea disminuye su longitud, la posición de los máximos se desplaza a altas frecuencias y aumenta su distancia relativa.

Por otro lado e independiente de la sección tratada, el módulo de la resonancia asociada al altavoz aumenta cuando la línea decrece, mientras que el modo  $\lambda/4$  y armónicos disminuye (figura 5). En el límite, si la línea siguiera decreciendo, el módulo de la resonancia del altavoz sería máximo y nulos los modos de resonancia, es decir, se encontraría radiando en condición de pistón libre.

### Densidad de la fibra

Quizá sea el parámetro más importante puesto que “modela” la curva de impedancia y presión. Partiendo de una línea sin absorbente, es decir, un tubo guía de ondas, se va aumentando la cantidad de material absorbente por unidad de volumen interno para conseguir las densidades de empaquetamiento anteriormente indicadas. En lugar de utilizar la clásica fibra mineral que presenta problemas mecánicos de consistencia en sus fibras, además de aquellos relacionados con la salud, se empleó un tipo particular de fibra de poliéster hueca de cuatro sectores, cuya densidad inicial era de  $1,16 \text{ g/cm}^3$ .

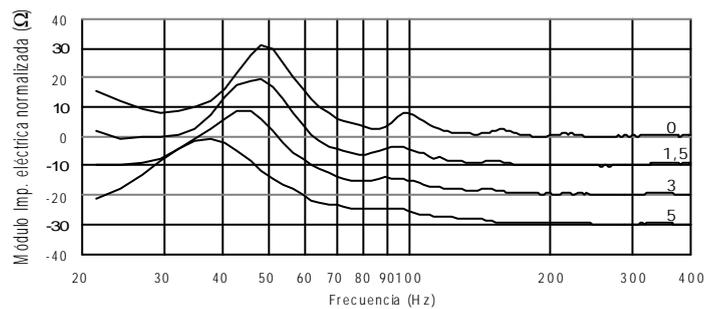


Figura 6. Módulo de la impedancia eléctrica para distintas densidades de empaquetamiento. Las curvas correspondientes a las densidades  $1,5$ ,  $3$  y  $5 \text{ kg/m}^3$  están desplazadas  $10$ ,  $20$  y  $30 \text{ W}$  respectivamente para su correcta visualización.

En la figura 6 se observa cómo la densidad del material absorbente suaviza la curva de impedancia eléctrica, modificando los valores de frecuencia y módulo de los máximos. El primer máximo, correspondiente a la resonancia del altavoz se desplaza a bajas frecuencias sin cambio apreciable en su módulo, tendencia observada en los últimos experimentos [3]. Por el contrario, los modos de vibración del tubo apenas sufren un decremento en su posición frecuencial, pero su módulo decrece apreciablemente hasta desaparecer para un valor de densidad de  $5 \text{ kg/m}^3$ .

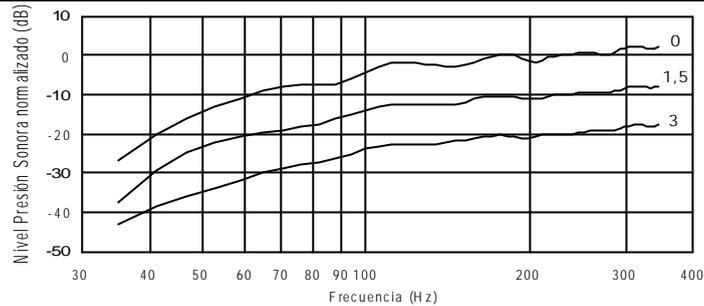


Figura 7. Nivel de presión sonora normalizado del altavoz para distintas densidades de empaquetamiento. Las curvas correspondientes a las densidades 1,5 y 3 kg/m<sup>3</sup> están desplazadas 10 y 20 dB respectivamente para su correcta visualización.

Los efectos observados en la posición de los mínimos de las curvas de presión sonora del altavoz son análogos al caso anterior. Efectivamente, como se observa en la figura 7, la curva correspondiente a la máxima densidad ha perdido las ondulaciones presentes en ausencia de material por los modos propios del tubo, mientras que el primer mínimo se ha desplazado ligeramente a baja frecuencia.

### Relación de superficies

La relación entre la superficie del diafragma y la sección de la línea revela un control importante sobre la impedancia eléctrica del sistema: cuanto mayor es la sección de la línea respecto al altavoz (líneas con apertura muy grandes), mayor es la magnitud de  $Z_{ee}$  para la resonancia del altavoz  $f_a$  y el resto de modos propios  $f_1$  (figura 8). Si la longitud de la línea controlaba la posición conjunta de los dos primeros máximos de la impedancia eléctrica, la relación  $S_0/S_D$  varía la distancia en frecuencia entre ellos. Efectivamente, como se observa en la figura 9, a medida que  $S_0$  aumenta, los máximos tienden a unirse en la frecuencia de resonancia del altavoz o frecuencia de ajuste del sistema  $f_a$ . Si esta relación tendiera al infinito, es decir, si el altavoz radiara en una línea con superficie infinita, sólo existiría un máximo localizado en la frecuencia de ajuste, como era de esperar de una situación de pistón en pantalla infinita [4].

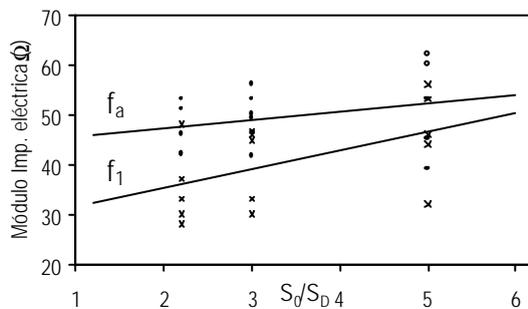


Figura 8. Módulos experimentales de máximos de impedancia eléctrica frente a la sección de la línea (○  $f_a$ , ×  $f_1$ ).

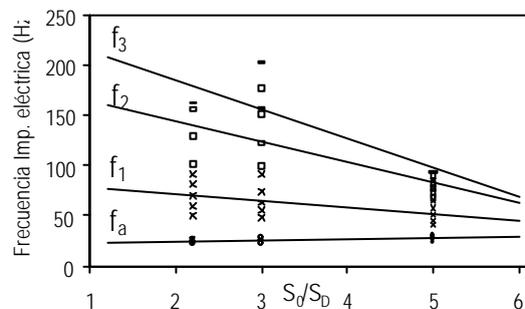


Figura 9. Frecuencias experimentales de máximos de impedancia eléctrica frente a la sección de la línea (○  $f_a$ , ×  $f_1$ , □  $f_2$ , -  $f_3$ ).

### CONCLUSIONES

La línea de transmisión acústica es un sistema radiante sonoro en baja frecuencia cuya impedancia eléctrica y presión sonora pueden modelarse variando ciertos parámetros físicos. Puesto que el comportamiento en el medio se ve reflejado sobre la impedancia eléctrica del sistema, el estudio de la misma revela aspectos muy interesantes de cara al control de la radiación acústica y de la carga eléctrica que representa.

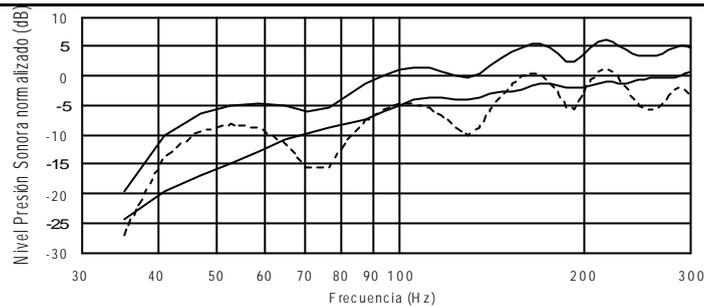


Figura 10. Nivel de presión sonora normalizado del altavoz (continua), boca (discontinua) y la suma de ambas (negrita) para una relación  $S_0/S_D=2,2$  y una densidad  $D=0 \text{ kg/m}^3$ .

Las figuras 10 y 11 representan los niveles de presión del altavoz, boca y de la suma de ambas, que dan una idea global del comportamiento de la línea de transmisión acústica en términos de radiación sonora en baja frecuencia. Obsérvese como un ajuste adecuado de la ondulación en la radiación de la boca puede extender considerablemente la frecuencia de corte inferior del sistema, sin que la linealidad en la respuesta total de la línea se vea afectada.

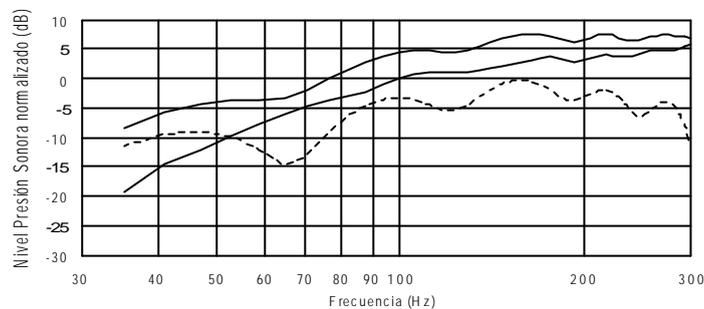


Figura 11. Nivel de presión sonora normalizado del altavoz (continua), boca (discontinua) y la suma de ambas (negrita) para una relación  $S_0/S_D=2,2$  y una densidad  $D=3 \text{ kg/m}^3$ .

La forma de las curvas de impedancia eléctrica y de presión sonora coincide con lo esperado por la teoría, sin embargo, la posición de los máximos y mínimos están desplazados en frecuencia. Los modos propios de cuarto de onda tras añadir una corrección en la longitud de la línea correspondiente a la condición de final sin pestaña [5] no coinciden con los máximos de impedancia experimental, sino que existe un desplazamiento en frecuencia de aproximadamente 20 Hz para todas las longitudes parciales e independiente de la relación entre secciones. Sin embargo, éstos sí se ajustan muy bien a la posición de los mínimos de presión, con diferencias menores del 1%.

La frecuencia de resonancia de 32,7 Hz del altavoz desciende a valores entre 21 Hz ( $l_{ef} = 2,69\text{m}$ ) y 27 Hz ( $l_{ef} = 1,1\text{m}$ ) cuando se inserta en la línea de transmisión. Podría considerarse que la masa del aire en la parte posterior del diafragma carga al altavoz y aumenta la masa móvil total, disminuyendo su frecuencia de resonancia mecánica, al igual que ocurre en la técnica de masa añadida para averiguar el volumen de aire equivalente  $V_{AS}$  de un altavoz bajo estudio. No obstante, los valores teóricos que se obtienen son menores que los experimentales. Por ejemplo, para la línea con relación  $S_0/S_D = 2,2$  y  $l_{ef} = 2,69 \text{ m}$ , la masa del aire en condiciones de temperatura ambiente es de 158 g, que añadidos a  $M_{MS}$  provocarían un descenso de la resonancia a 10,8 Hz, cuando el valor experimental es de 21 Hz. Los autores atribuyen el fenómeno a que el aire en la vecindad del altavoz podría comportarse como una compliancia acústica, elevando la frecuencia de resonancia del altavoz, como ocurre en cajas cerradas, y restando volumen de aire que interviene como masa añadida. La combinación de estos dos efectos podría ser la causa de la reducción parcial de  $f_s$ , línea en la que se continua investigando.

## AGRADECIMIENTOS

A Waldiberto de Lima Pires, UNESP (Brasil), por su inestimable colaboración en el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] Thiele, A. N., "Loudspeakers in Vented Boxes", Pt. 1, *J. Audio Eng. Soc.*, vol **19**, pp. 382 - 392; Pt. 2, vol 19, pp. 471-483.
- [2] Small, R. H. "Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis", *J. Audio Eng. Soc.*, vol **20**, pp. 383-395.
- [3] Pueo, B. and Romá, M., "Analysis and prototype measurements of a transmission line loudspeaker", in Proceedings of *The 17<sup>th</sup> International Congress on Acoustics*, Rome, 2001.
- [4] D'Appolito J., *Testing loudspeakers*, Audio Amateur Press, Peterborough, 1998, pp. 10-11.
- [5] Leach, W. M., *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design*, Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa, 1999, pp. 60-61.