

# ESTUDIO DE LA CURVA DE IMPEDANCIA DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

*Basilio Pueo Ortega*

Departamento de Física, Ingeniería de  
Sistemas y Teoría de la Señal  
Universidad de Alicante  
basilio@disc.ua.es

*Miguel Romá Romero*

Departamento de Física, Ingeniería de  
Sistemas y Teoría de la Señal  
Universidad de Alicante  
mroma@disc.ua.es

## ABSTRACT

The study of the input impedance of any electric device is essential in terms of electrical coupling. Moreover, if the device in question is of an electroacoustic nature, such as loudspeakers, another point of interest arises, namely the characteristic of this input electrical impedance, which reflects the acoustic phenomena produced nearby. Considering that enclosures comprise the last and most important stage in the electroacoustic conversion chain, a study about some physical factors that affects both electrical and acoustical impedances behaviour must be made. In particular, an advanced enclosure has been analyzed: the acoustic transmission line.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la impedancia eléctrica de entrada de cualquier dispositivo es fundamental en términos de acoplamiento eléctrico. Si el dispositivo en cuestión es de naturaleza electro-acústica, como son los altavoces, el estudio tiene además, un interés añadido: los fenómenos acústicos que se producen en el medio se ven reflejados sobre la curva de impedancia eléctrica de entrada. 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 impedancia acústica 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 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.

## 2. LÍNEA DE TRANSMISIÓN ACÚSTICA

Una línea de transmisión acústica es un sistema de radiación en baja frecuencia que consiste en un tubo 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.

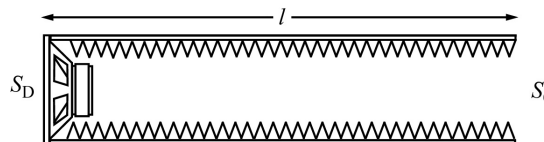


Figura 1. Línea de transmisión acústica.

La figura 2 muestra el circuito acústico equivalente de una línea de transmisión acústica con un transductor dinámico. 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.

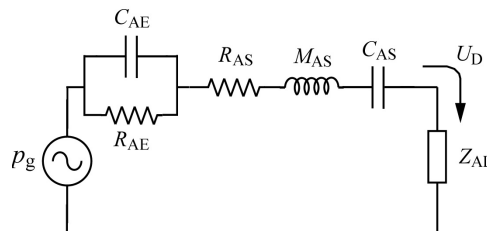


Figura 2. Circuito acústico equivalente de una línea de transmisión acústica.

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, el modelo basado en el amortiguamiento viscoso de la onda sonora cuando atraviesa el aire con cierto material absorbente, propuesto por M. J. King [1] proporciona resultados muy satisfactorios.

### 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Puesto que las expresiones derivadas del modelo de King no permiten una solución analítica, es necesario realizar simulaciones del sistema para estudiar su comportamiento. En ellas, se han empleado parámetros de altavoces de baja frecuencia en un algoritmo realizado con Mathcad®, y se ha estudiado la respuesta de la línea de transmisión variando sus parámetros principales.

A tenor de los resultados, se puede decir que las impedancias eléctrica y acústica del sistema, para un altavoz dado, son modificadas al variar *a)* la densidad de la fibra absorbente interior, *b)* la relación entre la sección transversal de la línea  $S_0$  y la del diafragma  $S_D$  y *c)* la longitud de la línea, es decir, la frecuencia de ajuste  $\lambda/4$ . En el presente trabajo, se estudia el comportamiento al variar los dos primeros.

La densidad de la fibra quizá sea el parámetro más importante puesto que “modela” la curva de ambas impedancias. Partiendo de una línea sin absorbente, es decir, un tubo guía de ondas, se va aumentando progresivamente la densidad hasta un valor de  $16 \text{ kg/m}^3$  observándose dos efectos muy interesantes: el primer máximo de la curva de impedancia acústica se desplaza a bajas frecuencias a la vez que se suaviza, es decir, su magnitud disminuye hasta perder prácticamente toda ondulación que presentaba en ausencia de absorbente debido a los modos propios de vibración de un tubo.

Por otro lado, la relación entre la superficie del diafragma y la sección de la línea, que debe ser constante para que lo expuesto sea válido, revela un control importante sobre la magnitud de la impedancia acústica: cuanto mayor sea la sección de la línea respecto al altavoz (líneas con apertura muy grandes), menor es la magnitud de  $Z_{AL}$ . En la figura 3 se aprecia dicha relación para el primer máximo de impedancia (*a*) y el segundo máximo (*b*).

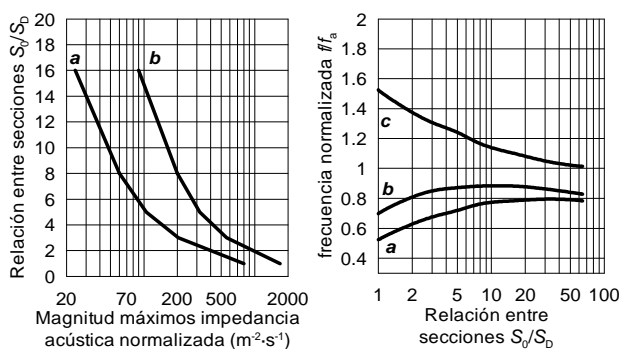


Figura 3. Relación entre secciones transversales y la frecuencia y magnitud de la impedancia acústica.

Si el parámetro anterior controlaba la posición conjunta de los dos primeros máximos de impedancia eléctrica, la relación  $S_0/S_D$  varía la distancia en frecuencia entre ellos. Efectivamente, a medida que  $S_0$  aumenta, los máximos tienden a unirse en la frecuen-

cia de ajuste del sistema  $f_a$ . Si esta relación tendiera al infinito, es decir, si el altavoz radiara libremente, sólo existiría un máximo localizado en la frecuencia de ajuste, como era de esperar.

En la misma figura 3 se representan las variaciones de la frecuencia del primer máximo (*a*) y segundo máximo (*c*), así como la posición del mínimo que se encuentra entre estos dos máximos (*b*). Se puede observar cómo el segundo máximo tiende a la frecuencia normalizada unidad, es decir, la forma de la curva coincide progresivamente con la de un altavoz sobre pantalla infinita.

A continuación, se presenta los resultados de la simulación de una línea de transmisión acústica para un altavoz comercial de graves, con  $f_s=31\text{Hz}$ , en línea  $\lambda/4$ ,  $l=2,76 \text{ m}$ ,  $D=6 \text{ kg/m}^3$  y  $S_0=660 \text{ cm}^2$  ( $S_0/S_D=3$ ). La impedancia acústica normalizada, (figura 4), presenta un primer máximo para la frecuencia de 24 Hz, lo que significa una reducción del 22% respecto a la resonancia del altavoz. El comportamiento de la misma corresponde a la impedancia acústica de radiación de un pistón sobre pantalla infinita.

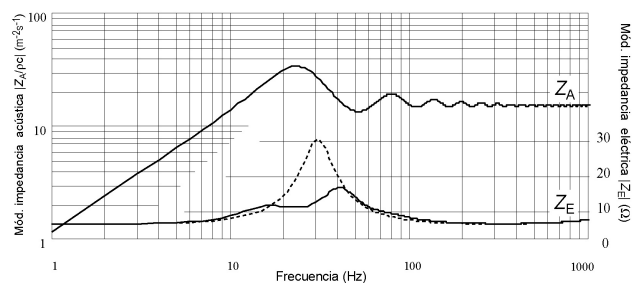


Figura 4. Impedancias eléctrica y acústica normalizada.

Por otro lado, la característica más importante que se puede apreciar en la curva de la impedancia eléctrica es la suavidad de la misma. Efectivamente, en la figura 4 se presenta el módulo de la impedancia eléctrica para el sistema anterior, en línea continua, junto con la curva de la impedancia eléctrica del mismo altavoz montado sobre pantalla infinita, en línea discontinua.

### 4. CONCLUSIONES

La línea de transmisión acústica es un sistema radiante sonoro en baja frecuencia cuya impedancia acústica puede 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.

El método de simulación propuesto resulta ser de gran utilidad ya que permite un control preciso de la curva de impedancia eléctrica y acústica, combinando las contribuciones individuales de los distintos parámetros analizados. Una elección cuidadosa de las características constructivas de la línea de transmisión permite sintonizar su respuesta para optimizar las prestaciones del sistema.

### 5. REFERENCIAS

- [1] King, M. J. “Derivation and Correlation of a Viscous Damping Model Used in the Design of a Transmission Line Loudspeaker System”, *personal report*.