

## Introducción al diseño de altavoces piezoeléctricos de radiación lateral

A. Soto Nicolás, R. Starobinski, A.M. Bruneau  
Laboratoire d'Acoustique. Institut d'Acoustique et Mécanique. Av. Olivier Mesiaen.  
72085 Le Mans. Francia.

### Abstract

A simple method is presented for modeling piezoelectric laterally radiating loudspeakers. The loudspeaker, consisting of several concentric cylindrical membranes separated by rigid cylinders, can provide a high volume of sound flow and a high level of pressure. The model considers the loudspeaker as a system of two guides coupled by a vibrating membrane. This modeling is very useful to a muffler designer especially in the preliminary design stage.

### Introducción

En trabajos recientes [1] [2] se han desarrollado modelos analíticos que tratan de describir el comportamiento de pequeños transductores (altavoces) piezoeléctricos de radiación lateral. Estos modelos tienen en cuenta el acoplamiento entre la vibración de la membrana y el aire, los efectos de inercia y compresibilidad del aire y otros efectos como la viscosidad o la disipación de energía en forma de calor, los cuales son fenómenos que tienen una incidencia muy débil en la respuesta del transductor y pueden ser despreciados a bajas frecuencias. [3] [4]. El modelo aquí presentado es basado en la descomposición del campo acústico en dos componentes que se propagan independientemente. De este modo puede simplificarse enormemente la solución sin perder precisión y pueden escribirse circuitos eléctricos equivalentes que permiten generalizar de una forma muy fácil el modelo a altavoces que poseen un gran número de membranas radiando en paralelo. La superposición de estas dos componentes del campo acústico permite en todo momento obtener el valor de la presión generada por el transductor.

En esta comunicación recordaremos primeramente la estructura general de estos transductores. Después presentaremos el modelo matemático y al final daremos un resultado experimental de un transductor. Todo el desarrollo, así como los resultados presentados lo son para el caso de un transductor de dos membranas, siendo inmediata la generalización del modelo para el caso de  $m$  membranas.

### Descripción del transductor

La Figura 1 muestra la estructura general de un transductor piezoeléctrico de dos membranas: Las dos membranas están separadas por cilindros rígidos. Entre el espacio membrana-cilindro rígido hay una lámina de aire.

La membrana está hecha de P.V.D.F. (Polyvinylidene). Se trata de un material piezoeléctrico monoorientado de unos micrómetros de espesor con el que, enrollándolo, hemos formado un cilindro. Cuando un potencial eléctrico  $V_r$  se aplica a la membrana vibra y se produce una radiación lateral, según la dirección  $z$ .

### Modelo matemático

El objetivo de este estudio analítico es describir el comportamiento del campo acústico en las láminas de aire situadas entre la cada una de las membranas y cada uno de los cilindros que las separan, teniendo en

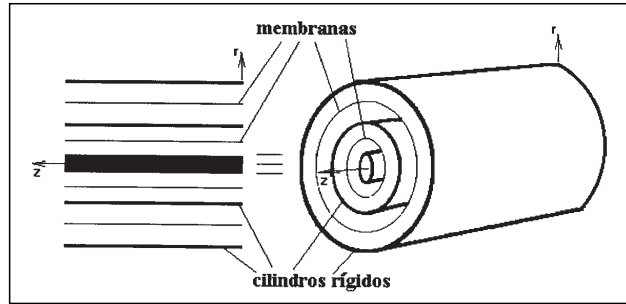


Figura 1. Transductor piezoeléctrico de radiación lateral de dos membranas

cuenta las interferencias entre la vibración de cada membrana y la vibración de las partículas de aire situadas a un lado y al otro de cada una de ellas.

Las aproximaciones

Las principales aproximaciones usadas en la formulación de las ecuaciones que describen el comportamiento del transductor son las siguientes:

- La variación de presión acústica no se desvía mucho del su valor medio calculado sobre la sección transversal de la lámina de aire correspondiente y puede sustituirse en las ecuaciones por este valor.
- Solo vamos a considerar dos velocidades: Una velocidad transversal, correspondiente a la velocidad de la membrana, y una velocidad lateral (solo posee componente z) correspondiente a la velocidad de las partículas de aire en las láminas.
- Todas las variables pueden ser sustituidas por su valor medio calculado sobre la sección transversal de la lámina de aire correspondiente.

Las ecuaciones

Haciendo estas aproximaciones. Las ecuaciones que describen el comportamiento del transductor son las siguientes:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_i^2\right)p_i^-(z) = 0 \quad i=a,b \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta_i^2\right)p_i^-(z) = N_i^2 p_{ui} \quad (2)$$

$$p_i^-(z) = \frac{F_{1i} \bar{p}_{1i}(z) + F_{2i} \bar{p}_{2i}(z)}{F_{1i} + F_{2i}} \quad (3)$$

$$p_i^-(z) = \bar{p}_{1i}(z) - \bar{p}_{2i}(z) \quad (4)$$

donde los términos  $p_{ui}$  y  $N_i^2$  pueden expresarse:

$$p_{ui} = -\frac{2d_{13} V_{ri}}{S_{11} D_{mi}} \quad (5)$$

$$N_i^2 = \rho_0 \frac{\pi D_{mi}}{\mu_s} \frac{F_{1i} + F_{2i}}{F_{1i} F_{2i}} \quad (6)$$

y los números de onda  $k$  y  $\beta$  :

$$k_i = \frac{\omega_i}{c} \quad (7)$$

$$\beta_i^2 = k_i^2 - N_i^2 \quad (8)$$

$i$  es un subíndice indicando la membrana interna ( $i=a$ ) y la membrana externa ( $i=b$ ).  $j=1, 2$  indica la lámina de aire 1 y 2.  $\bar{p}_{ji}(z)$  es la presión acústica.  $d_{13}$  es el coeficiente piezoeléctrico del material P.V.D.F.  $V_{ri}$  el potencial aplicado.  $S_{11}$  el coeficiente de elasticidad del P.V.D.F.  $F_{ji}$  es la superficie correspondiente a la sección transversal de las láminas de aire.  $\mu_s$  la masa por unidad de superficie de las membranas.  $\rho_0$  es la masa por unidad de volumen del aire.  $\omega$  es la pulsación y  $c$  la velocidad del sonido.

Condiciones frontera

Las condiciones frontera pueden escribirse usando el valor medio de la presión en las laminas de aire como sigue:

$$F_{ji} \nabla_{zji} (0) = Y_{oji} \bar{P}_i (0) \quad j = 1, 2 \quad (9)$$

$$F_{ji} \nabla_{zji} (l_z) = - Y_{iz} \bar{P}_{1i} (l_z) \quad i = a, b \quad (10)$$

$$j = 1, 2 \quad (11)$$

$$\bar{P}_a (l_z) = \bar{P}_b (l_z) = P$$

$$F_{2a} \nabla_{z2a} (l_z) + F_{2b} \nabla_{z2b} (l_z) = U \quad (12)$$

Circuito eléctrico equivalente

El transductor puede descomponerse en dos subsistemas por cada uno de los cuáles circulan dos ondas: Una onda llamada onda plana ( $p_i^+(z)$ ) [5] la cual esta caracterizada por un número de onda  $k_i$ , y otra llamada onda transversal ( $p_i^-(z)$ ) la cual esta caracterizada por un número de onda  $\beta_i$ . La onda plana y la onda transversal se propagan de forma independiente por el subsistema correspondiente y solo interactúan en el contorno a través de un transformador ideal "Tr" para obtener así el valor de la presión acústica radiado por el transductor. El esquema de un circuito equivalente para uno de estos transductores se ilustra en la figura 2.

Comparación teoría-experiencia

Un ejemplo de un transductor diseñado con este modelo matemático es el presentado en la figura 4. La longitud de cada membrana es de 2cm. Los cilindros rígidos tiene un diametro de  $D_1=1\text{cm}$ ,  $D_2=1.94\text{cm}$ , y  $D_3= 5.66\text{cm}$  los cilindros formados por cada una de las membranas tienen un diametro de  $D_{ma}=1.54\text{cm}$  y  $D_{mb}=4.36\text{cm}$ . Al transductor se le hace radiar en una cavidad  $V_1$  de  $2\text{cm}^3$  y las membranas son excitadas con una señal sinusoidal de 3 voltios la membrana interna y 5 voltios la membrana externa. La cavidad  $V_2$  de  $3\text{cm}^3$  situada en la parte posterior del transductor sirve para aumentar el flujo sonoro de la membrana interna. La figura 3 muestra la curva teórica y experimental obtenidas.

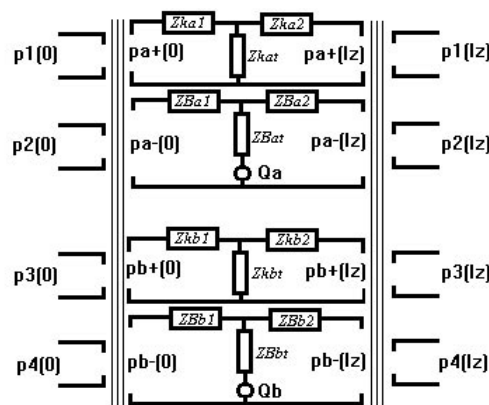


figura 2. El circuito equivalente

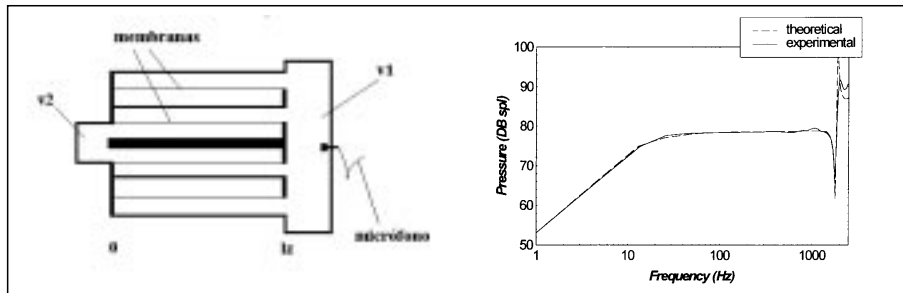


figura 3. El transductor diseñado y la respuesta teórico-experimental obtenida

### Conclusión

Asumiendo que la mitad del valor de la longitud de onda de excitación de la señal es grande con respecto al espesor de las laminas de aire los resultados obtenidos muestran una relación teórico-experimental excelente. Entendemos por ello que el modelo matemático puede ser usado como herramienta de diseño y optimización de este tipo de transductores.

### Referencias

- [1] Z. Skvor, F. Kadlec, A.M. Bruneau, P. Lotton. Piezoelectric transducer with monoaxially oriented piezopolymer diaphragm. Acta Polytechnica, vol. 32, No. 1/1992.
- [2] P. Lotton. Modelisation d'un système membrane -mince couche de fluide, aplicación a un Haut-Parleur à rayonnement lateral. Thesis. Université du Maine 1994.
- [3] Z. Skvor. Vibrating Systems and their Equivalent Circuits. Elsevier. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo 1991.
- [4] P. Lotton, A. Soto Nicolás, A.M. Bruneau, M. Bruneau. An improved model to describe amplitude and phase behaviour of actuators. Inter noise 96 proceedings. Liverpool, UK 1996.
- [5] R. Starobinski and J. Kergomard. Optimisation of characteristics of perforate tube mufflers. Fourth international congress on sound and vibration. St. Petesbourg. Russia. June 1996.