

Radiación acústica de superficies planas: impedancia mecánica de radiación

E. Escuder Silla, J. Alba Fernández, J. Ramis Soriano, J. Cruaños Catalá

Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Universitat Politècnica de València, Ctra. Nazaret Oliva s/n, 46730 Grau de Gandía (Spain). Tel: +34 962849300, Fax:+34 962809309 e-mail: evescude@fis.upv.es

RESUMEN: En este trabajo, se presenta un procedimiento para determinar la impedancia mecánica de radiación de un altavoz de modos distribuidos sujeto a diferentes condiciones de contorno (DML: Distributed Modes Loudspeaker) [1], [2].

Las velocidades en la superficie del panel, obtenidas mediante la técnica de holografía acústica de campo cercano (NAH) [3], se utilizan como valores de entrada para determinar por integración numérica la resistencia de radiación del altavoz para diferentes condiciones de contorno. Se utilizan dos métodos diferentes para realizar la predicción, el modelo de pistón plano y la matriz de resistencia de radiación acústica.

ABSTRACT: In this work, a procedure appears to determine the mechanical radiation impedance of a Distributed Modes Loudspeaker (DML) subject to different conditions of contour [1], [2].

The speeds on the surface of the panel, are obtained by means of Nearfield Acoustical Holography (NAH) technique [3]. These measurements are used like values of entrance to determine by numerical integration the radiation resistance of the loudspeaker for different conditions of contour. Two methods different are used to make the prediction, flat piston model and acoustic radiation resistance matrix.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el diseño de altavoces convencionales se ha centrado en eliminar resonancias en la respuesta del altavoz. La reciente tecnología NXT se basa en el concepto contrario, en la producción del mayor número de resonancias posibles en cada frecuencia. Si pensamos en un diafragma vibrando aleatoriamente a través de su superficie, cada pequeña área del panel vibra independientemente de sus áreas vecinas, como un array de celdas unidad. Cada celda radia de forma diferente, sin correlación pero sumándose para producir el efecto deseado. La energía total es como si proviniera de una sola fuente constituida por múltiples fuentes unidad.

Esta es la base de la tecnología NXT que se basa en el principio de modos distribuidos y q consiste en excitar el diafragma de forma que produzca el máximo número de resonancias de

flexión, la densidad modal es alta. La vibración que resulta es tan compleja que produce un campo difuso.

Sin embargo la radiación del altavoz DML dependerá de las condiciones de contorno a las que se someta, en este trabajo nuestras condiciones diferentes serán el número de sujeciones.

En este trabajo, pretendemos predecir la resistencia de radiación acústica de un altavoz DML mediante dos métodos diferentes, el modelo de radiación de pistón plano y rectangular y el de la matriz de resistencia de radiación acústica. Para realizar una predicción objetiva se utilizan datos de entrada de velocidad en diferentes puntos del panel obtenidos mediante NAH.

2. FORMALISMO GENERAL

2.1 Impedancia mecánica de radiación una superficie rectangular

El modelo de pistón plano parte de la hipótesis de que, en general, la radiación producida por la vibración de una superficie extendida, tal como un pistón, se puede obtener como la suma de presiones que producirían una asociación de fuentes simples. Se supone que la velocidad de vibración es perpendicular a la superficie y que es constante en todos sus puntos [4]. La presión total radiada por una superficie rectangular con velocidad de vibración armónica $u_0(x, y)$ resulta

$$p = -j\rho_0 f e^{-j\omega t} \int_{x=-Lx/2}^{x=Lx/2} \int_{y=-Ly/2}^{y=Ly/2} \frac{u_0(x, y) e^{jk\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}}}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}} dx dy \quad (1)$$

Sustituyendo en (1) la velocidad de vibración de la superficie, se puede obtener la presión radiada en un punto del espacio, lo que permite predecir el campo de presiones generado por la placa.

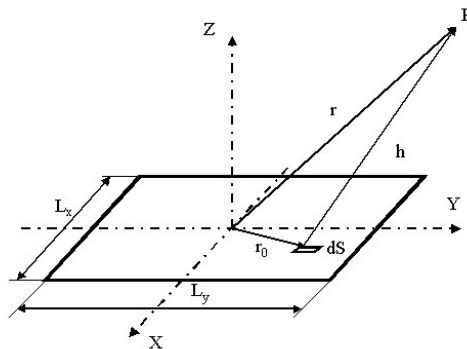


Figura 1- Pistón rectangular vibrante



El concepto de impedancia mecánica de radiación está asociado a la fuerza de reacción F_R que ejerce el aire sobre el panel del altavoz oponiéndose a que el panel se mueva, respecto a la velocidad con la que se mueve el panel [5]

$$Z_{MR} = \frac{F_R}{u_0 e^{-j\omega t}} \quad (2)$$

La fuerza de reacción depende de la presión que se ejerce sobre la superficie de la membrana

$$F_R = -\iint_S p dS' \quad (3)$$

Se sustituye la expresión de la presión radiada por una superficie rectangular (1) en la fuerza de reacción, integrando sobre todos los elementos de superficie y sustituyendo en (3) se obtiene

$$Z_{MR} = \frac{1}{u_0} j\rho_0 f \int_{x'=-Lx/2}^{x'=Lx/2} \int_{y'=-Ly/2}^{y'=Ly/2} \int_{x=-Lx/2}^{x=Lx/2} \int_{y=-Ly/2}^{y=Ly/2} \frac{u_0(x, y) e^{jk\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}}}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}} dx dy \quad (4)$$

Esta expresión se calcula aplicando el método de Romberg de integración numérica.

2.2 Matriz de resistencia de radiación acústica

La matriz de resistencia de radiación acústica R_{ik} corresponde a la función de transferencia que relaciona las velocidades normales de una estructura vibrante con las presiones sonoras en su superficie [6]. Esta cantidad es independiente de la vibración y depende sólo de la geometría de la estructura. La dimensión de R_{ik} viene definida por el número de subdivisiones virtuales de la estructura. Se puede definir la impedancia de radiación específica local en una superficie S como el cociente complejo entre la amplitud de presión sonora p_i en el punto i debido a la fuente puntual localizada en el punto k, y la velocidad V_{n_k} .

$$Z_{S_{ik}} = \left(\frac{p_i}{V_{n_k}} \right) \quad (5)$$

Asumiendo que la longitud característica de los elementos de superficie es pequeña comparada con la longitud de onda acústica típica, entonces la presión y la velocidad pueden considerarse constantes sobre cada elemento y puede representarse mediante un valor promedio. La impedancia acústica es



$$Z_{ik} = \begin{pmatrix} p_i \\ u_k \end{pmatrix} \quad (6)$$

y la matriz de resistencia de radiación acústica R_{ik} se obtiene tomando la parte real de Z_{ik} .

La potencia sonora radiada de una estructura vibrante se define como el cociente de promedio temporal en el que la energía sonora fluye a través de una superficie completa alrededor de la estructura. Si se considera que la estructura se divide en N elementos pequeños la potencia radiada es

$$W_{rad} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N Z_{ik} u_i u_k^* + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N Z_{ik}^* u_i^* u_k \quad (7)$$

intercambiando los índices, ordenando los sumatorios y aplicando el principio de reciprocidad $Z_{ik} = Z_{ki}$ se obtiene

$$W_{rad} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N R_{ik} u_i u_k^* = \frac{1}{2} u^H R u \quad (8)$$

donde u es el vector de velocidad volumétrica complejo, H denota el hermítico y R es la matriz de resistencia real $N \times N$. Si los elementos de u se expresan tal que $u_i = |u_i| e^{j\phi_i}$, entonces

$$W_{rad} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N R_{ii} |u_i|^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N R_{ik} |u_i| |u_k| \cos(\phi_k - \phi_i) \quad (9)$$

donde la primera parte de la ecuación (9) corresponde a la resistencia propia y la segunda parte a la resistencia cruzada, que da una medida del acople acústico entre los elementos de superficie i -ésimo y k -ésimo. La matriz de resistencia se evalúa numéricamente mediante el método de Hashimoto denominado *discrete calculation method*, en el que el panel se divide en elementos virtuales pequeños. Cada elemento rectangular se trata como un pistón circular con un área igual a la del elemento correspondiente. Con esta aproximación la resistencia propia y la cruzada resultan

$$R_{ii} = \rho_0 c S_i \left[1 - \frac{J_1(2ka_i)}{ka_i} \right] \quad (10) \quad \text{y} \quad R_{ik} = \frac{2\rho_0 c k^2 S_i S_k}{\pi} \left[\frac{J_1(2ka_i)}{ka_i} \frac{J_1(2ka_k)}{ka_k} \right] \frac{\sin kr_{ik}}{kr_{ik}} \quad (11)$$



respectivamente, donde c es la velocidad del sonido, S_i y S_k son las superficies de los pistones equivalentes, $a_i = \sqrt{S_i/\pi}$ y $a_k = \sqrt{S_k/\pi}$ son los radios de los pistones y J_1 es la función de Bessel de primer orden.

2.3 NAH

La técnica NAH, se utiliza para reconstruir el campo sonoro y la velocidad de vibración de un objeto o fuente sonora, a partir de presiones medidas en un array de micrófonos, en un plano paralelo y cercano a la fuente [7]. Esta técnica comprende la grabación de la amplitud y la fase de la presión sonora con un array plano de micrófonos, para calcular mediante técnicas de reconstrucción digital la estructura de la fuente de sonido objeto.

La ecuación de retropropagación de NAH se basa en la transformada de Fourier espacial. Permite determinar la presión a partir de medidas en un plano (holograma h) a un plano paralelo $z = d$

$$p(x, y, d) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, h) x e^{-ik_z(h-d)} e^{ik_x x} e^{ik_y y} dk_x dk_y \quad (12)$$

Una vez determinada la presión, se puede determinar el vector velocidad a partir de la ley de Newton para fluidos:

$$\nabla p = i\omega\rho v \quad (13)$$

La componente normal de la velocidad resulta:

$$\hat{V}(k_x, k_y, d) = (1/\omega\rho) \hat{P}(k_x, k_y, h) (k_z e^{-ik_z(h-d)}) \quad (14)$$

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se analizaron dos altavoces DML, uno de 60x60 cm² y otro de 59x57 cm². Se montan en un marco de corcho, el panel puede quedar empotrado libremente que será el caso considerado sin sujeciones, y posteriormente se le añaden las sujeciones puntuales, una por cada lado, en el centro del lateral. En la parte posterior del panel está ubicado un transductor electromecánico constituido por un imán y una bobina. El altavoz se situó en una cámara semianecoica.

Se utilizó un array lineal de micrófonos de ¼” de alimentación por lazo de corriente, una tarjeta de sonido profesional, y un amplificador de 16 canales. Se usó un robot para la toma de medidas en un plano paralelo y a 6 cm del altavoz. Se tomaron medidas cada 5 cm de separación en el eje x y en el y . Para la grabación de las señales se usó un programa de grabación de audio multipistas. La señal emitida para el estudio fue ruido blanco a una frecuencia de muestreo de 44100 Hz.

4. RESULTADOS

4.1 NAH

En la figura 2, se puede observar como cambia el nivel de presión del altavoz plano en función de diferentes condiciones de sujeción, sin embargo en las figuras de velocidad normal no se observa diferencia apreciable en los valores.

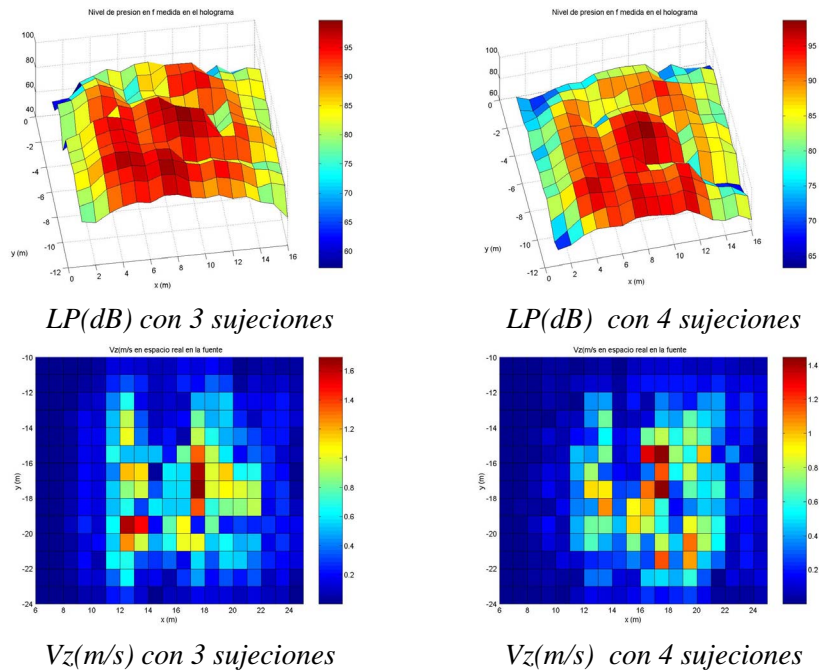


Figura 2- Niveles de presión (LP) en el holograma y velocidades normales del panel a 500 Hz para 3 y 4 sujeciones

4.2 Resistencia de radiación

En la figura 3 se pueden observar la predicción de los valores de resistencia de radiación normalizada utilizando el modelo de pistón rectangular, suponiendo una velocidad promedio constante calculada a partir de las medidas con holografía, para un altavoz DML de 60x60 cm².

En la figura 4 se representan la predicción del comportamiento de la resistencia de radiación a partir del método de la matriz de resistencia de radiación usando los valores de entrada de las componentes normales de la velocidad en el panel calculadas mediante holografía, para un altavoz DML de 45x60 cm². En las figuras 3 y 4, se observa que desde 100 Hz hasta 4 kHz la resistencia de radiación crece de forma exponencial, en 4 kHz se presenta el máximo de resistencia y a partir de esta frecuencia se mantiene alrededor de un valor constante

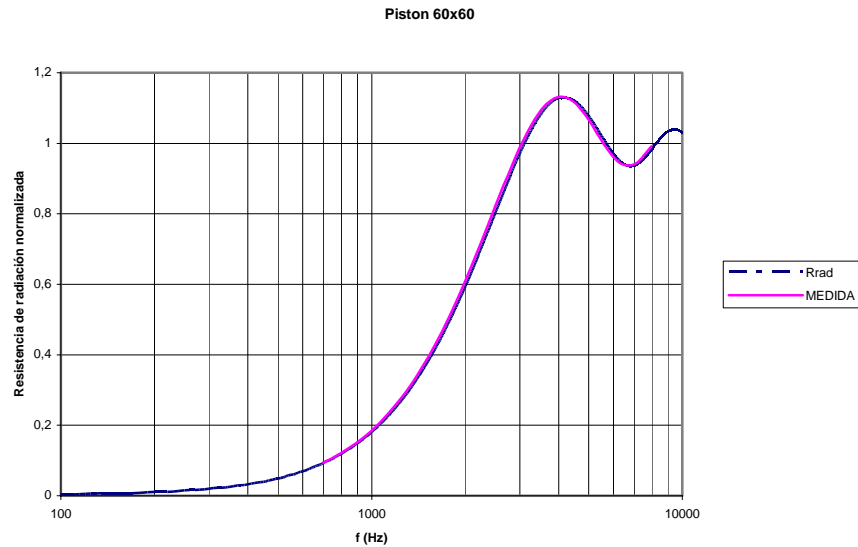


Figura 3- Resistencia de radiación normalizada, R_{rad} : modelo pistón rectangular, MEDIDA: método matriz R , para un altavoz DML de $60 \times 60 \text{ cm}^2$.

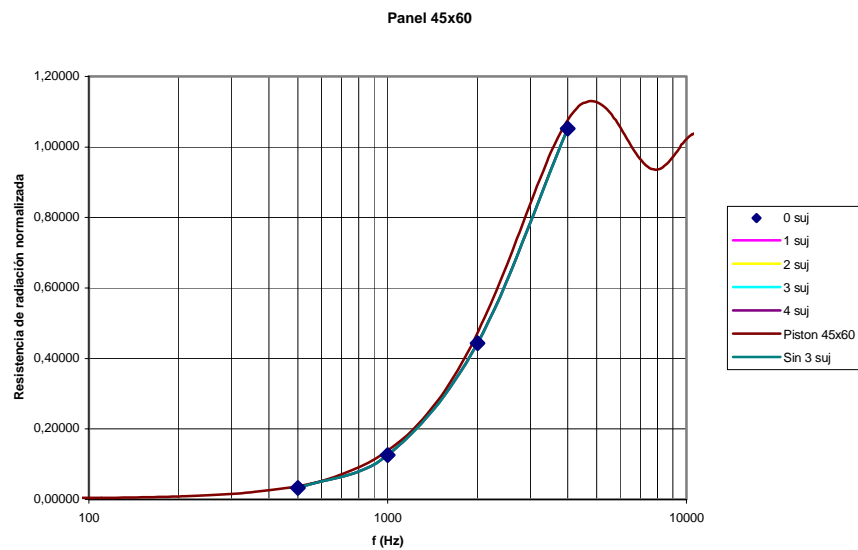
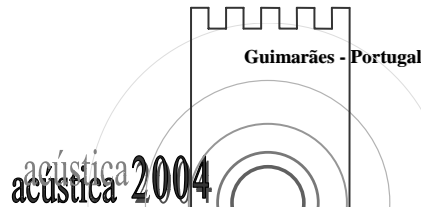


Figura 4- Resistencia de radiación normalizada para diferentes sujeciones: 0, 1, 2, 3 y 4 sujeciones usando el método de la matriz R

5. CONCLUSIONES

La resistencia de radiación acústica de un altavoz DML no depende del número de sujeciones a las que se le somete. Crece exponencialmente con la frecuencia hasta 4 kHz donde alcanza su máximo y a partir de esa frecuencia se comporta con un valor aproximadamente constante.



Al variar el número de sujeciones se modifica el nivel de presión en la superficie del altavoz. El método de pistón plano y el de la matriz de resistencia ofrecen un resultado similar en la predicción de la resistencia de radiación acústica de un altavoz DML. Debido a que el panel contiene un gran número de ondas de flexión, su densidad modal es alta y por tanto la resistencia de radiación con sujeciones es aproximadamente igual a la resistencia de radiación de un panel apoyado simplemente. [8]

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MAT 2003-04068)

REFERENCIAS

- [1] <http://www.vxm.com/NXT.htm>
- [2] <http://www.nxtsound.com/technology/FAQs.php?MODE=SURF>
- [3] J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, “*Nearfield acoustic holography: Theory of generalized holography and the development of NAH*”, Journal of the Acoustical Society of America, 78 (4), octubre 1985, 1395-1413
- [4] J. Alba Fernández, J. Ramis Soriano, V. Espinosa Roselló, V. Sánchez Morcillo, “*Radiación acústica por superficies planas: aplicación a altavoces*”, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería., 19, 1, 65-74 (2003), ISSN: 0213-1315
- [5] J. Alba Fernández, J. Ramis Soriano, “*Efecto de la modificación del perfil en el rendimiento de altavoces dinámicos de radiación directa*”, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 18, 2, 243-254 (2002)
- [6] J. P. Arenas, M. J. Crocker, “*Sound radiation efficiency of a baffled rectangular plate*”, International Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 7, 4, 2002
- [7] E. Escuder, J. Ramis, J. Alba, F. Hernández, M. Ardid, R. Picó, J. Redondo, “*Análisis de la influencia de las condiciones de fijación en la radiación de una superficie de policarbonato.*”TECNIACÚSTICA 2003. 34º Congreso Nacional de acústica. Encuentro ibérico de acústica. EAA SYMPOSIUM., 2003
- [8] K. Renji, “*On the effect of boundaries on radiation resistance of plates*”, Tettters to the editor, Journal of the Acosutical Society of America, 110 (3), Pt. 1, sep 2001