

## SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL OÍDO MEDIO BAJO LA EMISIÓN ACÚSTICA DE AURICULARES

**Daniel Carmona y Leonardo Molisani**

*Grupo de Acústica y Vibraciones (GAV), Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional 36 Km. 601. (X5800BYA) Río Cuarto, Córdoba.  
Argentina.*

*e-mails: dcarmona@ing.unrc.edu.ar, lmolisani@ing.unrc.edu.ar*

**Palabras clave:** pérdida auditiva, modelo del oído medio, simulaciones numéricas.

**Resumen:** Recientes investigaciones han demostrado un aumento en el riesgo de sufrir pérdidas auditivas asociadas al uso de auriculares en la población en general. Ciertas actividades laborales y el mal uso de los aparatos de escucha de música modernos provocan disfunciones precoces en la audición, además de otros problemas de salud. Distintos manuales de equipos sonoros advierten que el uso prolongado de auriculares puede ser perjudicial para el oído. El oído externo recibe energía acústica del auricular, que luego se propaga por el canal auditivo como ondas acústicas. El oído medio es excitado por las ondas acústicas produciendo vibraciones en sus componentes. La conversión de energía acústica a energía vibratoria se realiza en la membrana timpánica. Los modelos recientes del oído externo y medio que se han presentado en la literatura abierta muestran que desde la emisión de sonidos hasta la transformación de la vibración en potencial eléctrico, la energía sigue las leyes básicas de la mecánica. Por lo tanto el comportamiento dinámico del oído medio es modelado numéricamente. La simulación de la dinámica del oído incluye el acoplamiento entre la cavidad acústica del canal y la estructura del oído medio. En este trabajo, un modelo completo para la simulación de la dinámica acoplada entre la estructura y las cavidades acústicas del oído externo y medio, se utilizan para caracterizar la respuesta del oído medio. Este sistema acoplado es excitado por un auricular (fuente acústica), colocado externamente al canal del oído. La respuesta dinámica del oído medio obtenida mediante el uso de este modelo, es comparable a la respuesta del oído real, que luego se transmite al oído interno a través de la ventana oval. Para asegurar la calidad del modelo se compararon las simulaciones con resultados experimentales provenientes de exámenes audiométricos objetivos de impedanciometría. El oído medio constituye un sistema acústico de alta complejidad, cuya impedancia representa la reacción propia en relación con la estimulación sonora que la afecta. La simulación del oído externo y medio permite caracterizar el comportamiento del oído medio bajo la carga acústica del auricular.

## 1 INTRODUCCION

El tema sobre el sentido de la audición se trata en este trabajo como el “mecanismo de la Audición” [1], que si bien a veces es interpretado como el proceso auditivo en si, en este caso hace especial referencia al aspecto mecánico envuelto en la captación y conducción de energía acústica del medio. La Figura 1 muestra la estructura del sistema de audición humana. El oído externo por medio del conducto auditivo capta las ondas sonoras que son transportadas por el aire. En el tímpano estas ondas acústicas son transformadas en vibraciones que se trasladan por el oído medio a través de los huesecillos en el oído medio hasta la cóclea, lugar en el oído interno, en el que serán transformadas en impulsos eléctricos. Desde que el sonido es emitido hasta el momento en el que la vibración se transforma en un potencial eléctrico, esta energía sigue las leyes de la mecánica y por lo tanto su comportamiento puede ser modelado numéricamente [2].

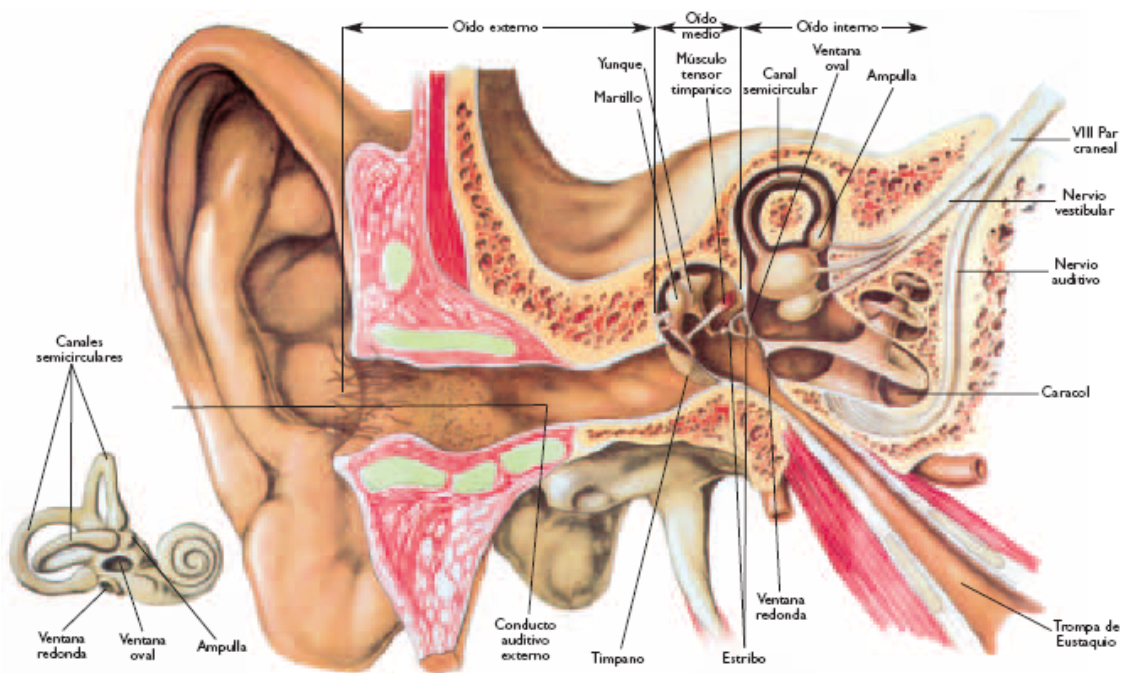


Figura 1: Estructura del oído humano.

## 2 MODELO DEL OIDO HUMANO

### 2.1 Objetivos y Método de Simulación

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo analítico del oído humano que refleje el comportamiento acústico-estructural del oído real. Este modelo es excitado acústicamente a través de un auricular. El modelo de interacción acústico-estructural es mostrado en la Figura 2.

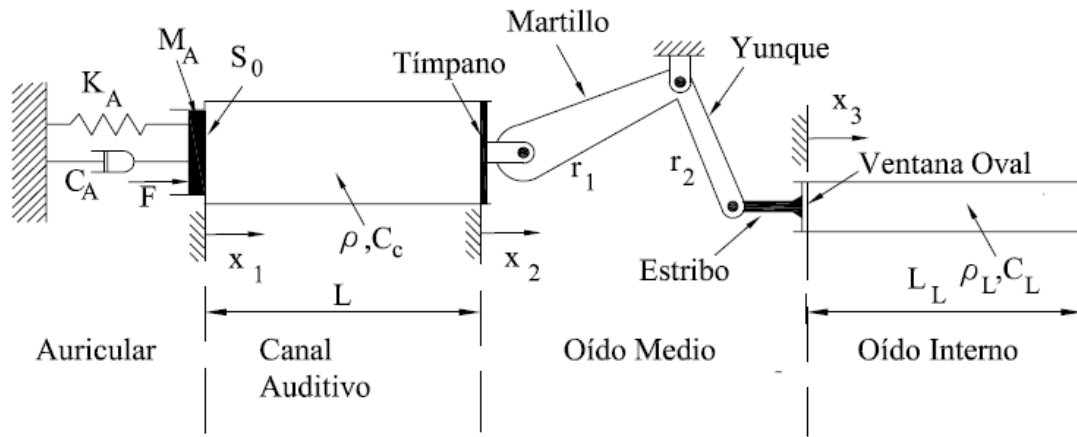


Figura 2: modelo acústico-estructural del oído humano.

La dinámica del sistema acoplado oído externo-auricular es descrita a través de la siguiente ecuación

$$\left[ C_A + i \left( \omega M_A - \frac{K_A}{\omega} \right) \right] \dot{x}_1 = S_0 p(0) + F \quad (1)$$

donde  $C_A$  es la disipación resistiva del auricular,  $M_A$  es la inductancia del auricular,  $K_A$  es la inversa del valor de la capacidad eléctrica del auricular,  $i$  es la unidad imaginaria,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $S_0$  es el área promedio de la sección de la entrada del canal auditivo,  $p(0)$  es la presión acústica actuando sobre el auricular,  $F$  es una excitación armónica de tensión eléctrica actuando sobre el auricular. El modelo de interacción descrito por la ecuación (1) es mostrado en la Figura 3.

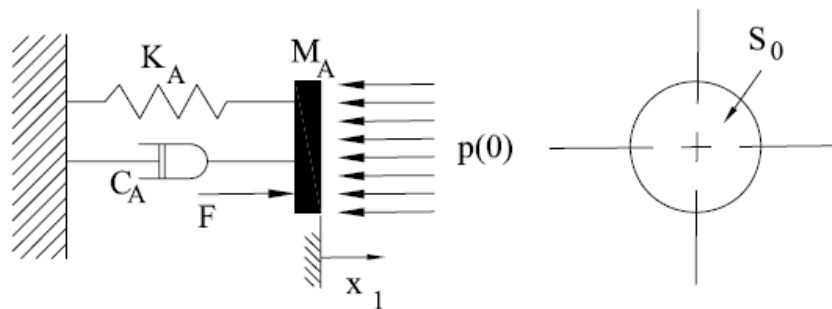


Figura 3: modelo de interacción del oído externo-auricular

La presión acústica dentro del canal auditivo es dada por

$$p(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} G_1(x|0) i\omega \rho \dot{x}_1 r dr d\theta - \int_0^{2\pi} \int_0^{R_2} G_1(x|L) i\omega \rho \dot{x}_2 r dr d\theta \quad (2)$$

Donde  $G_1$  es denominada función de Green o función de interacción,  $\rho$  es la densidad del aire,  $\dot{x}_1$  es la velocidad de la parte móvil del auricular,  $\dot{x}_2$  es la velocidad de la membrana timpánica,  $R_1$  es el radio promedio de la sección de entrada del canal auditivo, y  $R_2$  es el radio promedio de la membrana timpánica. Un esquema del modelo acústico del canal auditivo puede observarse en la Figura 4.

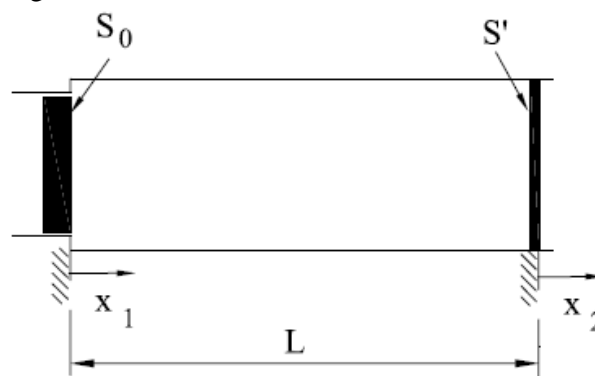


Figura 4: esquema del modelo acústico del canal auditivo.

Para obtener la función de Green es necesario resolver el problema acústico en la cavidad auditiva [3]. Asumiendo que la excitación sobre la cavidad auditiva es armónica, la ecuación de Helmholtz con condiciones de borde tipo “pared rígida” es usada como sigue

$$\nabla^2 p - K p = 0 \quad (3)$$

Donde  $K$  es el número de onda libre. Resolviendo la ecuación (3) se obtienen los autovalores (números de ondas) y autofunciones (modos acústicos) [4]. Los autovalores y autofunciones se utilizarán para construir la función de interacción  $G_1$ ,

$$K_n = \frac{n\pi}{L} \quad \text{y} \quad \psi_n(x) = \cos(K_n x) \quad (4)$$

La función de Green para el canal auditivo es aproximada como

$$G_1(x|x_0) = \sum_{n=1}^{NA} \frac{\psi_n(x) \psi_n(x_0)}{\Lambda_n (K_n^2 - K^2)} \quad (5)$$

Con  $\Lambda_n$  denominado factor de normalización de los modos acústicos definido como

$$\Lambda_n = \int_0^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_0^L [\psi_n(x)]^2 r dx d\theta dr \quad (6)$$

La ecuación (2) que representa la presión acústica dentro del canal auditivo puede ser escrita después de la integración como

$$p(x) = S_0 \sum_{n=1}^{NA} \frac{\cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right)}{\Lambda_n(K_n^2 - K^2)} i\omega\rho\dot{x}_1 - S \sum_{n=1}^{NA} \frac{\cos\left(\frac{n\pi}{L}x\right)\cos(n\pi)}{\Lambda_n(K_n^2 - K^2)} i\omega\rho\dot{x}_2 \quad (7)$$

El siguiente sistema acústico a resolver corresponde a la cóclea en el oído interno cuyo fluido es conocido como perilinfa. En la cóclea o caracol, las ondas sonoras se transforman en impulsos eléctricos que se envían al cerebro. El cerebro traduce esos impulsos en sonidos que podemos reconocer y entender [5]. La Figura 5 muestra un esquema del modelo acústico y a la cóclea humana.

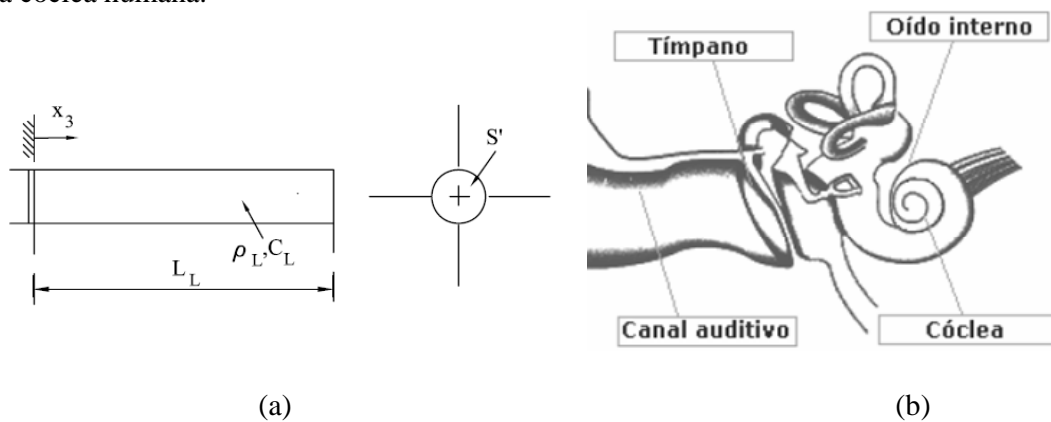


Figura 5: (a) modelo acústico de la cóclea, (b) cóclea humana.

La presión acústica en la perilinfa es ocasionada por el movimiento de la ventana oval,

$$p'(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_3} G'(x|0) i\omega\rho_L \dot{x}_3 r dr d\theta \quad (8)$$

Donde  $p'(x)$  es la presión acústica,  $G'$  es la función de interacción en la cóclea,  $\rho_L$  es la densidad de la perilinfa,  $\dot{x}_3$  es la velocidad del movimiento de la ventana oval y  $R_3$  es el radio medio de la sección de la cóclea. Procediendo en forma similar a cuando se resolvió el problema de autovalores en la cavidad acústica del canal auditivo, es posible construir la función de interacción  $G'$  de la cóclea a partir de los modos y los números de onda de la cavidad acústica de la cóclea.

Los modos acústicos y autovalores en la cavidad de la cóclea son

$$K_j = \frac{j\pi}{L_L} \quad y \quad \eta_j(x) = \cos(K_j x) \quad (9)$$

$L_L$  es la longitud de la cóclea desplegada. De esa manera

$$G'(x|x_0) = \sum_{j=1}^{NA} \frac{\eta_j(x)\eta_j(x_0)}{\Lambda_j(K_j^2 - K_L^2)} \quad (10)$$

Donde  $K_L$  es el número de onda libre en el fluido perilinfa, y  $\Lambda_j$  es el factor de normalización de los modos acústicos definido como en la ecuación (6).

De esa forma, la presión acústica en la cóclea luego de la integración de la ecuación (8) es dada por

$$p'(x) = S' \sum_{j=1}^{NA} \frac{\cos\left(\frac{j\pi}{L_L} x\right)}{\Lambda_j \cdot (K_j^2 - K_L^2)} i\omega \rho_L \dot{x}_3 \quad \text{con} \quad K_L = \frac{\omega}{c_L} \quad (11)$$

Donde  $S'$  es el área de la ventana oval y  $c_L$  es la velocidad del sonido en el fluido perilinfa.

La transmisión de movimiento en el oído medio puede ser observada en la Figura 6. El sistema de huesecillos se modela como un sistema de transmisión de fuerzas a través de un sistema de palancas mecánicas.

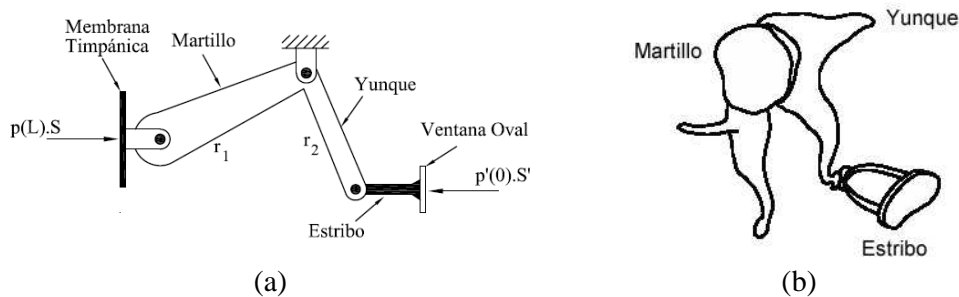


Figura 6: (a) modelo acústico-estructural del oído medio, (b) oído medio humano.

En la Figura 6 puede observarse que el desplazamiento de la membrana timpánica,  $x_2$ , no es independiente del movimiento de la ventana oval,  $x_3$ , la restricción en el movimiento es representada por la siguiente relación de velocidades

$$\frac{\dot{x}_2}{r_1} = -\frac{\dot{x}_3}{r_2} \quad (12)$$

La relación de fuerzas entre la membrana timpánica y la ventana oval puede representarse por

$$p(L)S = H_1 p'(0)S' \quad (13)$$

Donde  $H_1$  para el oído humano es aproximadamente igual a 1.3 [2]. Reemplazando las ecuaciones (7), (11), y (12) en la ecuación (13) se obtiene

$$SS_0 \rho \sum_{n=1}^{NA} \frac{\cos(n\pi)}{\Lambda_n \cdot (K_n^2 - K^2)} \dot{x}_1 + \left[ (S')^2 \rho_L H_1 H_2 \sum_{j=1}^{NA} \frac{1}{\Lambda_j (K_j^2 - K_L^2)} - S^2 \rho \sum_{n=1}^{NA} \frac{1}{\Lambda_n (K_n^2 - K^2)} \right] \dot{x}_2 = 0 \quad (14)$$

Con

$$H_2 = \frac{r_2}{r_1} \sim 1.3 \quad (15)$$

Reemplazando (7) en (1), la dinámica del auricular acoplado al canal auditivo es representada por

$$\left[ C_A + i \left( \omega M_A - \frac{K_A}{\omega} \right) - i S_0^2 \omega \rho \sum_{n=1}^{NA} \frac{1}{\Lambda_n (K_n^2 - K^2)} \right] \dot{x}_1 + i S_0 S \omega \rho \sum_{n=1}^{NA} \frac{\cos(n\pi)}{\Lambda_n (K_n^2 - K^2)} \dot{x}_2 = F \quad (16)$$

Las ecuaciones (14) y (16) conforman un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas en  $\dot{x}_1$  y  $\dot{x}_2$ . Una vez obtenidas las velocidades en el auricular,  $\dot{x}_1$ , y en la membrana timpánica,  $\dot{x}_2$ , es posible obtener por integración los desplazamientos en los puntos de interés: membrana timpánica y ventana oval, asimismo se obtiene la presión acústica en el canal auditivo mediante la ecuación (7) y la presión acústica dentro del oído interno en el fluido perilimfa mediante la ecuación (11).

### 3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos en este desarrollo son comparados con resultados experimentales y con otro modelo de parámetros concentrados previamente desarrollado en la referencia [6]. La comparación se realiza sobre el desplazamiento de la membrana timpánica para caracterizar el comportamiento del oído medio. En todos los casos un nivel sonoro de 90 dB con referencia a 20  $\mu$ Pa se utilizó como carga acústica en el oído para todas las líneas espectrales de interés. Las dimensiones de las distintas partes del oído corresponden a valores promedios del oído de humanos en adultos extraídos de la referencia [7].

Las frecuencias naturales acústicas del canal auditivo,  $f_n$ , están relacionadas al número de onda  $K_n$  a través de la siguiente relación [8]

$$f_n = \frac{c}{2\pi} K_n \quad (17)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido en el aire con un valor de 343 m/s. En la Tabla 1 se presentan las primeras resonancias acústicas de la cavidad del canal auditivo. Solo la primera resonancia se encuentra con un valor menor a 8000 Hz, que es el límite superior en el rango de frecuencias explorado.

$f_n$	Frecuencia [Hz]
$f_1$	4083
$f_2$	8166
$f_3$	12250

Tabla 1: frecuencias naturales acústicas de la cavidad del canal auditivo.

La Figura 7 muestra el desplazamiento de la membrana timpánica versus frecuencia. En esta figura se presentan tres curvas: una en azul con puntos de diamantes corresponde a la

simulación de este trabajo, en puntos triangulares verdes son resultados experimentales, y en rojo con cuadrados es el resultado de un modelo presentado en la referencia [6].

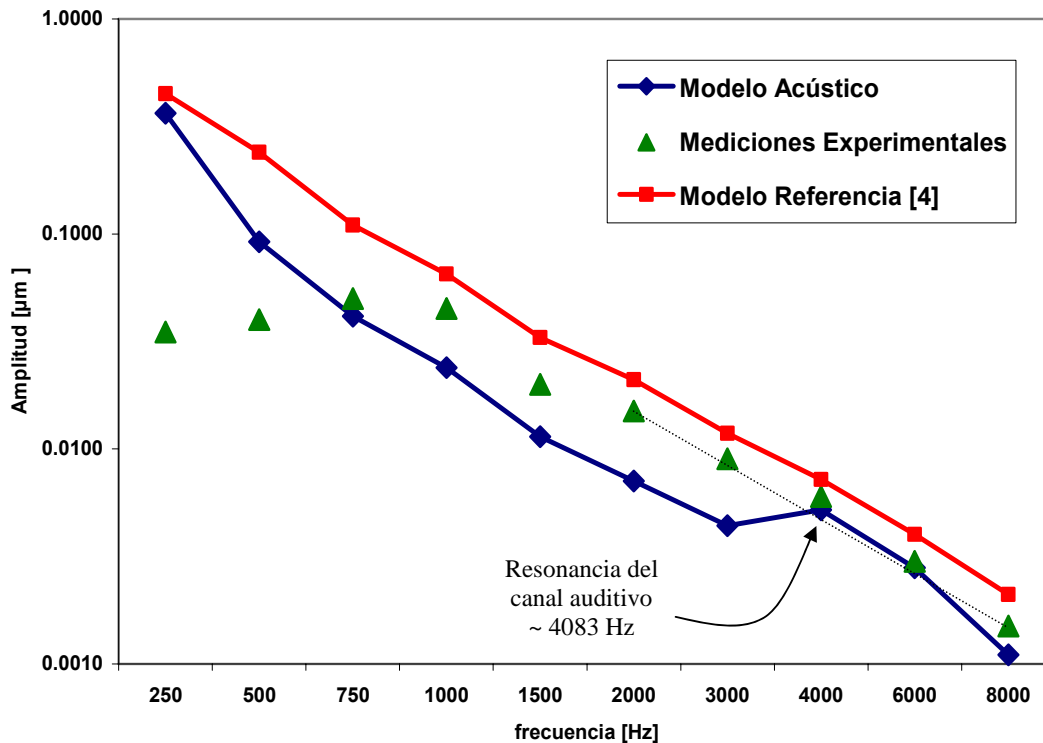


Figura 7: comparación del desplazamiento de la membrana timpánica (TM).

Como se observa en la Figura 7 a bajas frecuencias los modelos predicen valores más altos de desplazamiento que los valores medidos experimentalmente. Después de 1000 Hz los modelos conservan la pendiente de los valores experimentales. El modelo de interacción acústico-estructural desarrollado en este esfuerzo muestra el efecto de la resonancia del canal auditivo alrededor de los 4083 Hz, este efecto se observa también en los resultados experimentales. El efecto de la carga acústica de 90 dB (con referencia 20µPa) en el oído medio es transmitido hacia el oído interno, por lo que el efecto sonoro debe ser estudiado con mayor profundidad en el oído interno.

#### 4 CONCLUSIONES

El oído humano constituye un sistema de alta complejidad. Un modelo del oído humano fue desarrollado con el objetivo de caracterizar la respuesta del oído medio bajo la influencia de un auricular. El modelo presenta el acoplamiento entre la estructura del oído con las cavidades acústicas que son parte integral del mismo. Estas cavidades que poseen una dinámica propia son el canal auditivo y la cóclea con sus fluidos correspondientes. La resonancia del canal auditivo se acopla a al movimiento del tímpano en el rango de frecuencia de estudio.



El modelo reproduce satisfactoriamente mediciones experimentales del movimiento de la membrana timpánica. El efecto del auricular sobre el oído medio es producir movimiento que es transmitido hacia el oído interno.

## REFERENCIAS

- [1] Lara Saenz, A., Sobre la Evolución del Mecanismo de la Audición, Anales de Mecánica y Electricidad, *I.C.A.I.*, VOL LXXXI, Fascículo V, 2004.
- [2] Everet, A. F., *The Master Handbook of Acoustics*, The McGraw-Hill Companies, Inc., ISBN 0-07-139974-7, 2001.
- [3] Fahy, F., *Sound and Structural Vibration*, Academic Press, 2000.
- [4] L. Kinsler, A. Frey, A. Coppens, and J. Snders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons Inc., 2000,
- [5] Hear-it AISBL, <http://hear-it.org/>, Rue de Collège 27, B-1050 Brussels, Belgium, e-mail: [hear-it@hear-it.org](mailto:hear-it@hear-it.org), 2001.
- [6] Feng, B. and Gan, R. Z., A Lumped-Parameter Mechanical Model of Human Ear for Sound Transmission, *IEEE 0-7803-7612-9*, 2002.
- [7] Goode R., Killion M., Nakamura K. and Nishihara S., New Knowledge the Function of the Human Middle ear: Development of an improved Analog Model, *The American Journal of Otolaryngology*. Volume 15, Number 2, 1994.
- [8] R. Finch, *Introduction to Acoustics*, Pearson Prentice Hall, 2005.