



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

UTILIZACIÓN DEL MAC PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN UN ENSAYO DE UNA MEMBRANA SOMETIDA A PRESIÓN SONORA

PACS: 43.40.Dx

Lima-Rodriguez, Antonia; Garcia-Manrique, Jose; Rivero-Rubio, Antonio; Garcia del Rio, Alfonso; Gonzalez-Herrera, Antonio
Universidad de Málaga
Calle Dr. Ortiz Ramos s/n. Campus de Teatinos. C.P. 29071 Málaga. España
Málaga
España
Tel: 951952441; 951952440
E-Mail: tlima@uma.es; josegmo@uma.es; antoniorivero1195@gmail.com;
alfonsogdr@gmail.com; agh@uma.es

Palabras Clave: membrana, excitación sonora, modos de vibración, análisis modal, MAC adaptado

ABSTRACT

In a test of a membrane subjected to a sound excitation, as it is not possible to measure the excitation, it can not be determined FRF and therefore the experimental vibration modes.

The MAC is an analysis method to compare calculated and experimentally obtained vibration modes.

In this work, the MAC procedure has been adapted (adapted MAC) to compare the theoretical vibration modes of the modal analysis with those obtained in response to a given excitation.

With this variant of the MAC, the predominant vibration frequencies can be identified in a membrane subjected to sound pressure.

RESUMEN

En un ensayo de una membrana sometida a una excitación sonora, al no poder medir la excitación, no es posible determinar FRF y por tanto los modos de vibración experimentales.

El MAC es un método de análisis con el que se puede comparar modos de vibración calculados y obtenidos experimentalmente.

En este trabajo se ha adaptado el procedimiento del MAC (MAC adaptado) para comparar modos de vibración teóricos del análisis modal con los obtenidos como respuesta ante una excitación determinada.

Con esta variante del MAC se pueden identificar las frecuencias de vibración predominantes en una membrana sometida a presión sonora.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los componentes del sistema auditivo es la membrana timpánica situada en el oído medio, encargada de recibir las presiones sonoras que se transmiten a través del canal de audición.

Para el estudio de la membrana timpánica, ésta se puede considerar un material laminar. Debido a que son materiales de pequeño espesor y muy pequeña rigidez, para determinar sus propiedades mecánicas no son adecuados los ensayos tradicionales (como puede ser el ensayo de tracción), requiriéndose un cuidado especial en la determinación de estas propiedades. Una solución al problema es recurrir a ensayos dinámicos para caracterizar este tipo de materiales.

Cuando la membrana es sometida a un ensayo experimental usando una excitación sonora para obtener una respuesta dinámica de la misma, su respuesta depende de las características dinámicas y de las frecuencias y modos de vibración propios. Estudiando esta respuesta se puede realizar su caracterización.

La respuesta en frecuencia del sistema (FRF) o el MAC se usan para estudiar los modos de vibración de los materiales laminares. En este trabajo además se va a recurrir a una variante del MAC, adaptándose el procedimiento del MAC (MAC adaptado) para conocer cómo de dominante es un modo de vibración.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. Modal Assurance Criterion (MAC)

El método Modal Assurance Criterion, comúnmente denominado MAC, es un método de análisis usado para determinar cómo de parecidos son dos modos de vibración. En una estructura permite comparar un modo de vibración obtenido mediante un método experimental con el obtenido de forma teórica [7]

El resultado del MAC es un escalar, calculado como el producto escalar de dos conjuntos de vectores φ_A y φ_X . La ecuación que se usa para el cálculo del MAC es la siguiente:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \cdot \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \cdot \{\varphi_A\}_r) \cdot (\{\varphi_X\}_q^T \cdot \{\varphi_X\}_q)}$$

Los valores que puede tomar el MAC están comprendidos entre 0 y 1. Si el resultado del MAC es 1 implica que los modos de vibración son idénticos, lo que significa una similitud del 100%; si su valor es 0, entonces los modos de vibración se diferencian mucho.

En este trabajo en vez de usar el procedimiento del MAC se va a usar una variante del MAC, con el que se va a comparar un modo de vibración a una frecuencia que no tiene por qué coincidir con una de las frecuencias naturales del problema, para estudiar cómo de dominante es éste.

Así que se ha adaptado el procedimiento del MAC (MAC adaptado) para comparar los modos de vibración teóricos obtenidos en el análisis modal con la respuesta en desplazamientos ante una excitación determinada.

2.2. Realización de los modelos de la membrana

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de una membrana sometida a presión sonora. Muchos de los modelos usados en los estudios presentados se han basado en trabajos fin de grado realizados en la Universidad de Málaga sobre la presente línea de investigación [8]

Uno de los parámetros importantes es determinar la geometría de la membrana. Se ha realizado el estudio de membranas de diferentes formas geométricas: circular y elíptica, y con diferentes espesores. Se ha obtenido el análisis modal y el análisis armónico de la membrana, con la finalidad de conseguir lo que se ha llamado MAC adaptado, para obtener información del comportamiento de la membrana en el espectro de las frecuencias audibles por el ser humano, de 0 Hz a 20 kHz de frecuencia.

En otros estudios se han obtenido los modos de vibración de las membranas circulares [5], denotando que hay ciertos modos que no aparecen debido a la simetría radial que presentan. Este problema de solape de modos de vibración no ocurre en las membranas elípticas, de ahí el interés en su estudio.

Por otro lado, se obtienen diversas Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF) que aportan información adicional para caracterizar la membrana.

El material a ensayar es plástico ABS con las siguientes propiedades: módulo de Young = 2 GPa, densidad = 1200 kg/m³, coeficiente de Poisson = 0,35.

2.3. Simulación numérica del modelo

Se han utilizado varios softwares para los estudios realizados en este trabajo. Por un lado el software ANSYS para la simulación mediante el método de los elementos finitos (FEM), y por otro el software MATLAB para el tratamiento de los datos y la obtención de los resultados. Con este último programa se han realizado las gráficas del MAC adaptado y del FRF.

En los modelos simulados se pueden distinguir dos volúmenes principales, uno correspondiente a la membrana del material con la forma estudiada y otro que sería el aire que la rodea. El elemento usado para la membrana es SOLID185, FLUID130 para la interfase exterior, y FLUID30 para los elementos acústicos. En otros estudios también se ha simulado el canal auditivo como un tubo con el fin de estudiar la influencia de éste [4]

Otro de los elementos simulados en el modelo es la fuente de sonido. La posición de la misma variará entre 3 orientaciones: 0º, 45º y 90º.

Por otra parte también se modela una capa de transición para el acoplamiento fluido-estructura. Para este acoplamiento fluido-estructura, que depende de muchos factores (posición de la fuente de sonido, frecuencias sonoras, puntos de medición, etc.) se han desarrollado modelos contrastados que ofrecen buenos resultados [1, 3, 5]

En el modelo se han establecido condiciones de contorno de empotramiento en el borde de la membrana y de volumen infinito en las áreas exteriores del volumen de aire. Uno de los puntos críticos del modelado es la elección del tamaño de los elementos presentes en los distintos volúmenes que forman el modelo. Cuanto más fino es el mallado más precisa es la solución del problema, pero mayor es el coste computacional. Se ha elegido un tamaño de elemento con el que el coste computacional no es excesivamente grande y la solución obtenida aceptable.

3. EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Análisis Modal

Se ha realizado el análisis modal para membranas circulares de diferentes radios y diferentes espesores. Por otro lado, también se ha realizado el análisis modal para membranas elípticas con distintos valores del semieje x y manteniendo el área de la membrana igual a 1 cm^2 .

Comparando los resultados se observa que para las membranas circulares no se diferencian todos los modos de vibración, estando algunos de ellos superpuestos, esto es debido a la simetría radial en su geometría. En el caso de membranas elípticas sí se pueden distinguir todos los modos de vibración, siendo la separación entre los modos mayor cuanto más pequeño es r_x , ya que más difiere la geometría de la elipse de un círculo.

Centrándonos en el estudio modal de la membrana elíptica de 1 cm^2 de área, $r_x = 0,25 \text{ cm}$ y $50 \mu\text{m}$ de espesor, se obtienen las frecuencias naturales mostradas en la tabla 1:

Modo	Frecuencia (Hz)	Modo	Frecuencia (Hz)	Modo	Frecuencia (Hz)
1	3050,6	11	9076,5	21	15111
2	3490,3	12	9799,7	22	15349
3	4001	13	9923,8	23	16314
4	4580,2	14	10856	24	16669
5	5236,7	15	10974	25	16730
6	5976,8	16	11866	26	16730
7	6794,2	17	12263	27	18070
8	7698,5	18	12947	28	18409
9	8301,1	19	13629	29	18705
10	8710	20	14107	30	19572

Tabla 1: 30 primeros modos de vibración de una membrana elíptica de área = 1 cm^2 , $r_x = 0,25 \text{ cm}$, espesor = $50 \mu\text{m}$

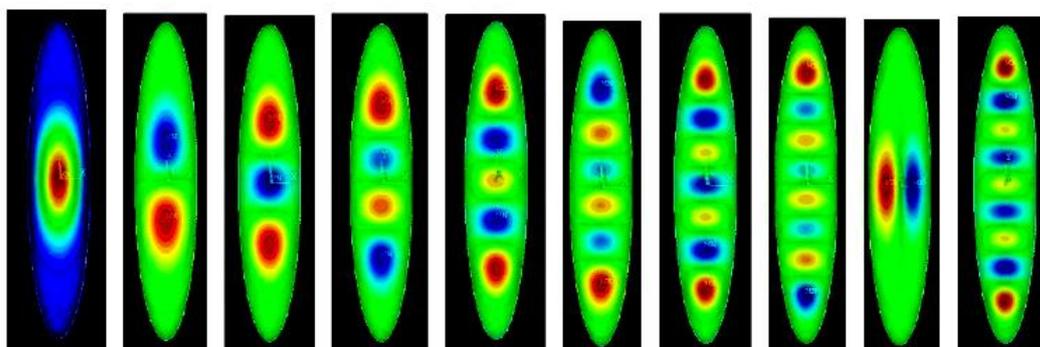


Figura 1: 10 primeros modos obtenidos en ANSYS de la membrana elíptica

3.2. Estudio del MAC adaptado

Se ha realizado un análisis armónico de una membrana elíptica con características geométricas descritas anteriormente: 1 cm^2 de área, $r_x = 0,25 \text{ cm}$ y $50 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor. El estudio se ha realizado para distintas posiciones de la fuente de sonido (0° , 45° y 90°) y en ella se impone una presión de 1 Pa .

El rango de frecuencias está entre 0 Hz y 20 kHz con incrementos de 50 Hz por iteración, lo que supone 400 frecuencias ensayadas. Del ensayo de cada frecuencia se ha obtenido los desplazamientos en el eje perpendicular de la membrana, eje z .

Para realizar el cálculo se han montado dos matrices, una de ellas con la información del ensayo armónico (matriz armónica), y la otra con la información modal (matriz modal). En la matriz armónica cada fila contiene los resultados de los desplazamientos de los nodos en la dirección z para las distintas frecuencias. Como hay 4146 nodos y se han ensayado 400 frecuencias, el tamaño de esta matriz es de 400×4146 . La matriz modal tiene un tamaño de 4146×30 .

Con los datos de estas dos matrices se aplica la ecuación del MAC para las 30 primeras frecuencias naturales, las comprendidas entre los 0 Hz y 20 kHz .

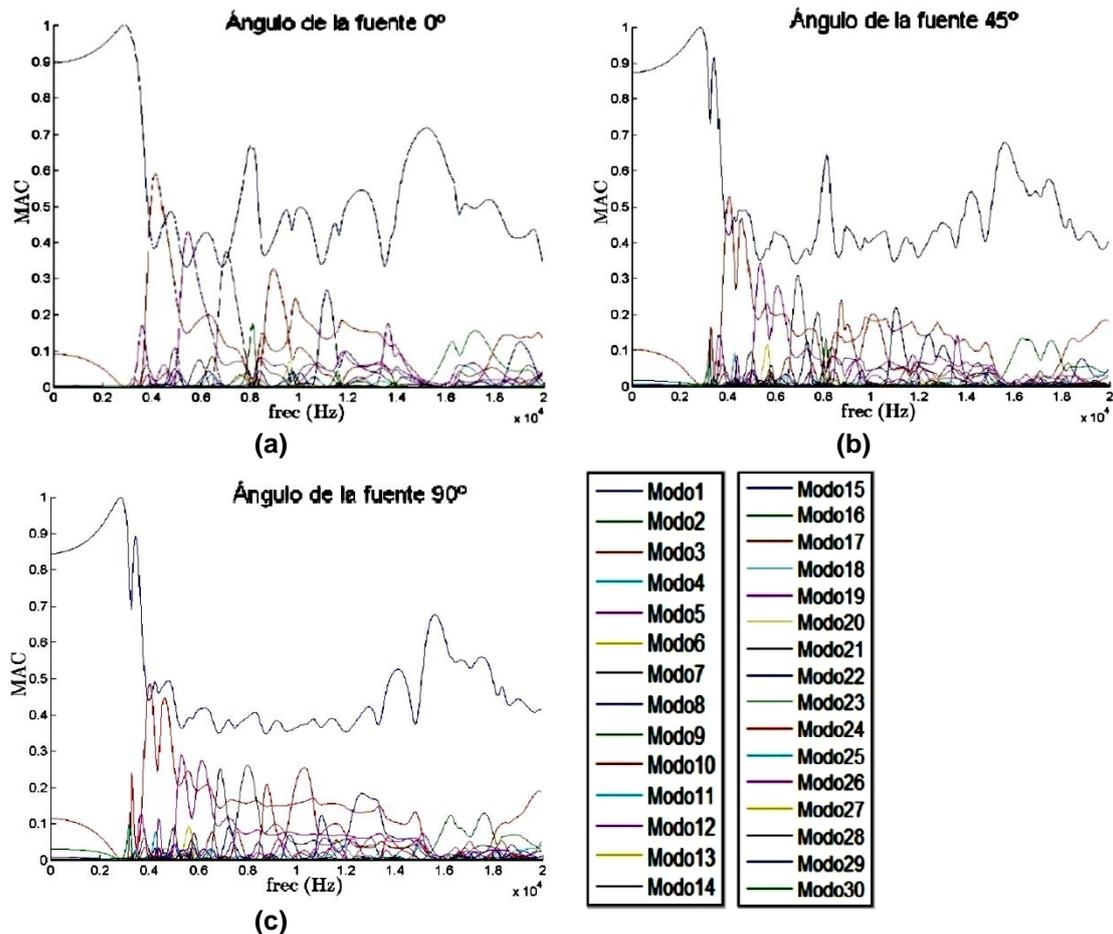


Figura 2: MAC adaptado para posición de la fuente a 0° (a), 45° (b) y 90° (c)

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Mirando las gráficas del MAC adaptado (figura 2), se puede sacar conclusiones sobre la influencia de los distintos modos de vibración. El primer modo se produce a una frecuencia de 3050 Hz, con lo que a frecuencias más bajas se encuentra la zona estática del comportamiento de la membrana. En esta zona se puede observar que el modo 1 tiene una gran presencia, como era ya sabido, pero lo extraño es que aparezca el modo 3 con una presencia entorno al 10 % en las tres posiciones de la fuente. Esto indica que en la zona estática la membrana se deforma con una combinación de dos modos de vibración, que a priori no era de esperar.

Si centramos el estudio en los modos del 10 al 20, las gráficas del MAC adaptado son las siguientes:

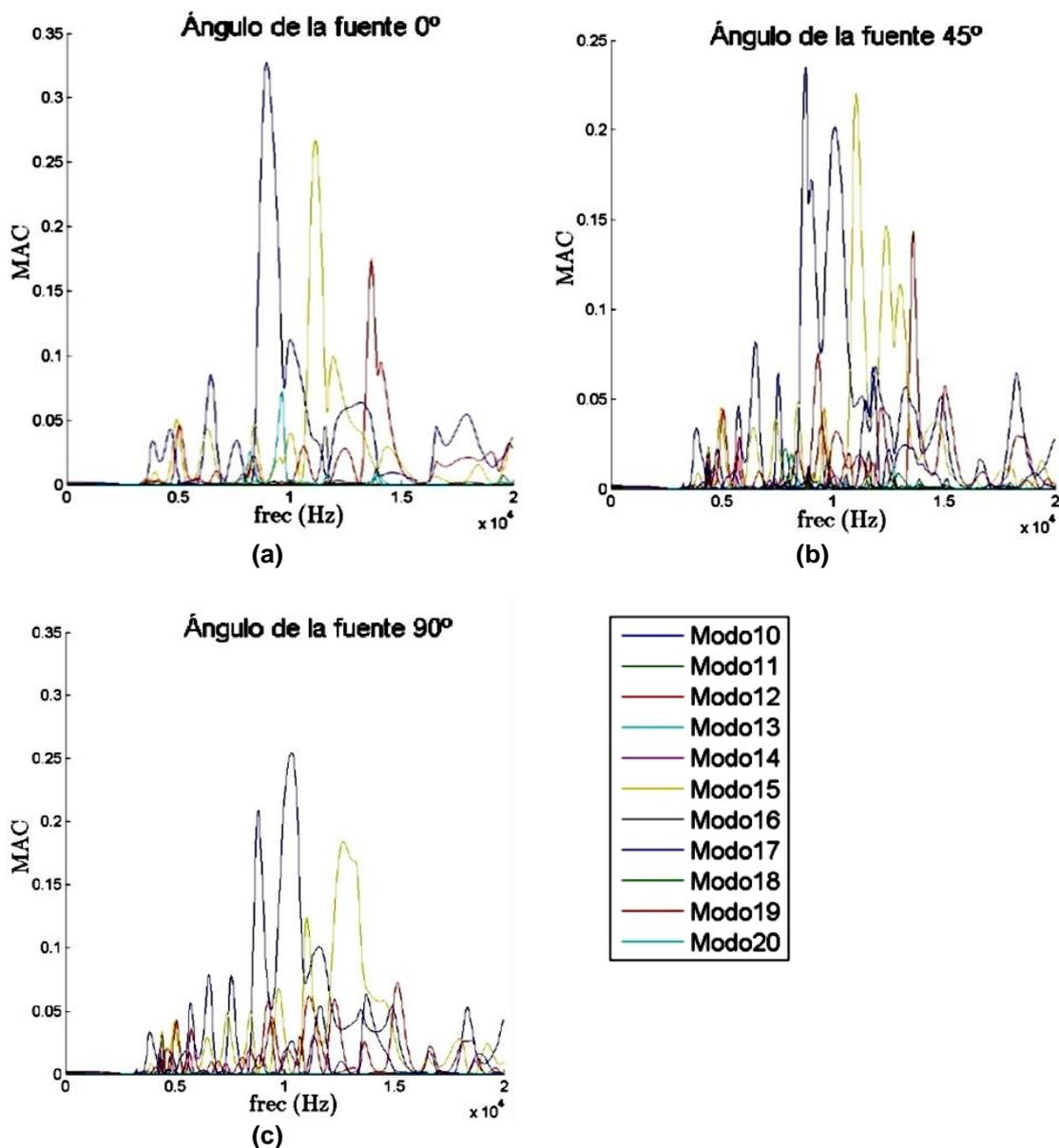


Figura 3: MAC adaptado para los modos entre el 10 y 20. Posición de la fuente de 0° (a), 45° (b) y 90° (c)

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Para estos modos se puede apreciar que hay predominancia de alguno de ellos, llegando al 35 % de presencia en algún caso. Se puede observar que hay modos que se ven mejor con algunas configuraciones que con otras, por ejemplo el modo 12 no aparece en el caso de la fuente a 90°. Como también era de esperar, los modos a frecuencias más altas son los menos dominantes en el comportamiento de la membrana.

3.3. Estudio de las FRF

Al estudiar las FRF de la membrana elíptica también se puede saber qué modos están más presentes en su respuesta y por tanto son más interesantes de estudiar.

Los nodos a los que se ha calculado las FRF son los situados en el eje horizontal de la membrana.

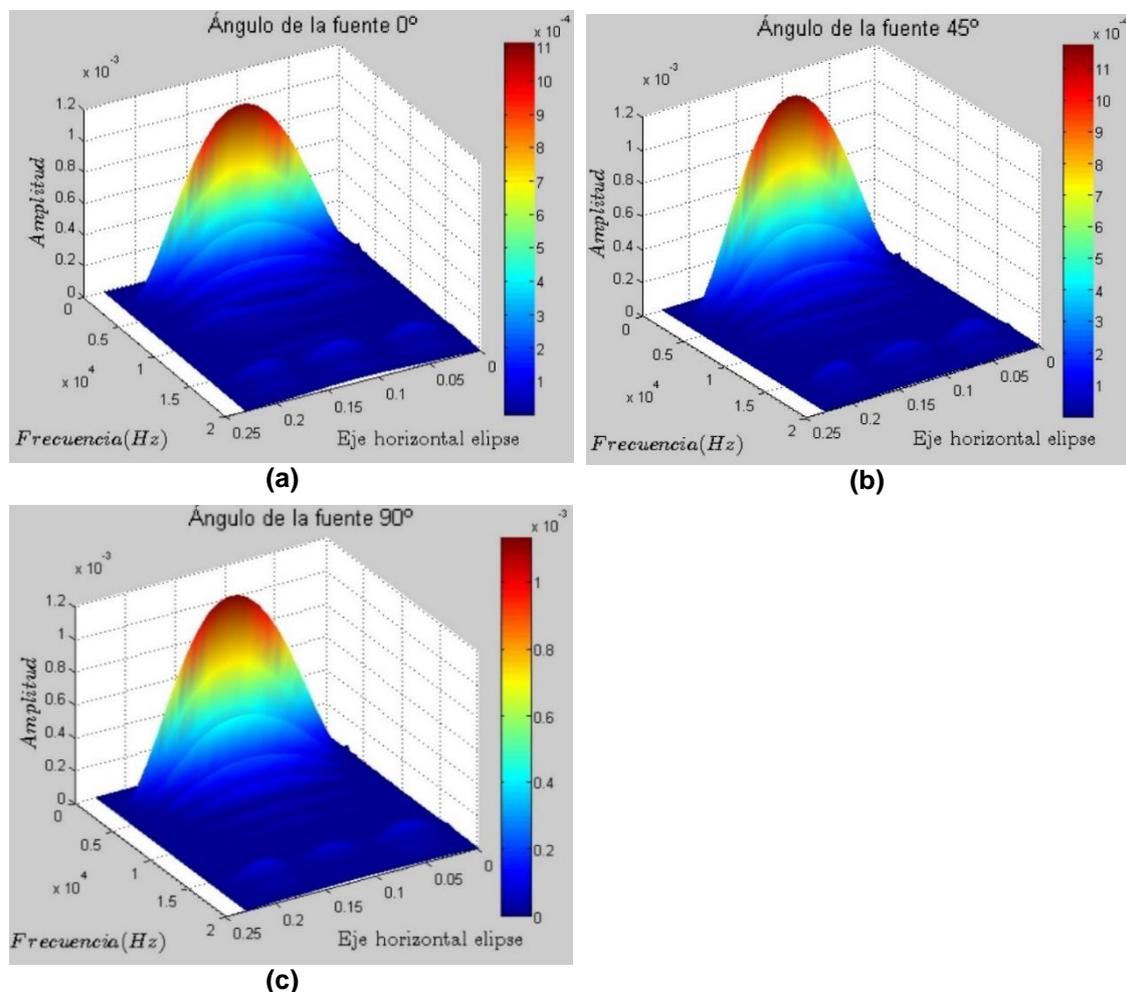


Figura 4: FRF de los nodos del eje horizontal para la posición de la fuente de sonido a 0° (a), 45° (b) y 90° (c)

Observando los resultados de los FRF se concluye que la respuesta de la membrana es muy parecida en torno a los 3 kHz (primer modo de vibración), sin embargo para ciertas frecuencias

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

más altas la respuesta sí es distinta, como se puede observar en la figura 5 en la que se representa la reconstrucción de la membrana para una frecuencia de 10 kHz.

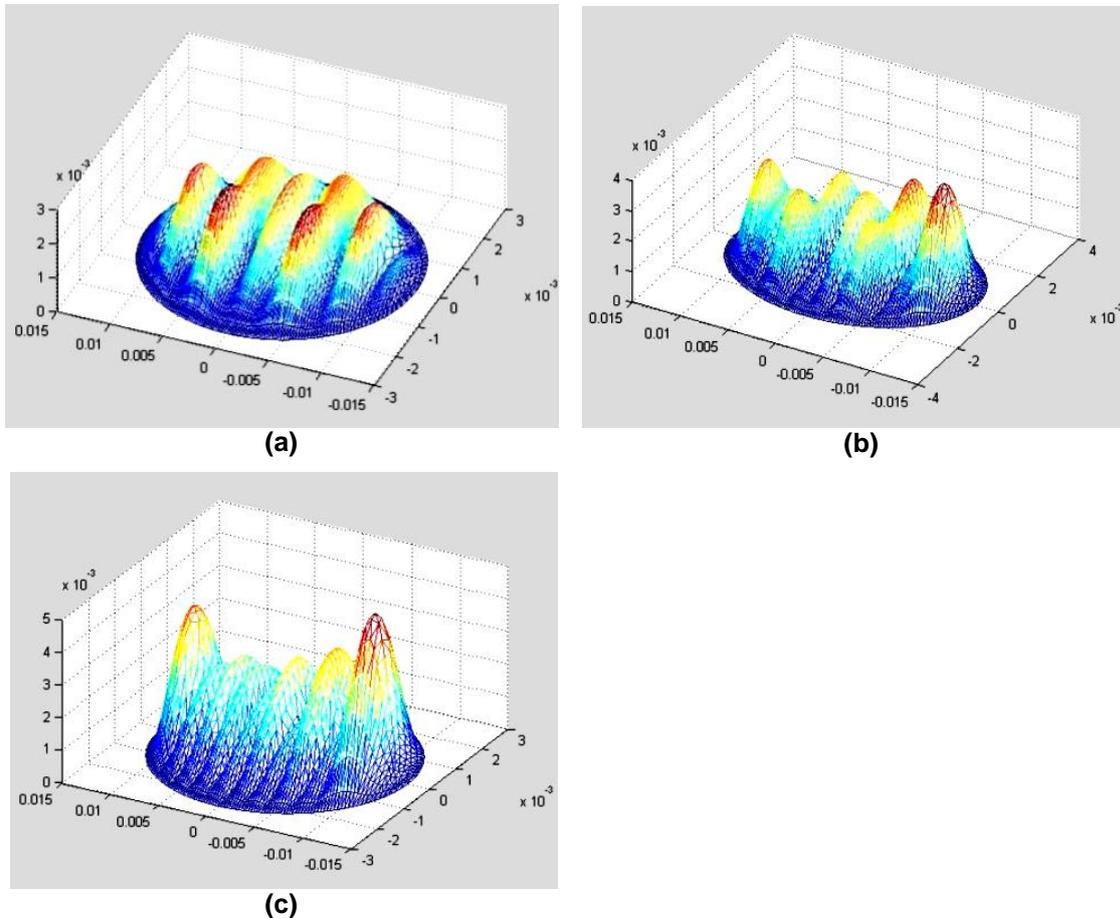


Figura 5: Reconstrucción de la membrana a 10 kHz para posiciones de la fuente de sonido a 0º (a), 45º (b) y 90º (c)

4. CONCLUSIONES

Con el método del MAC adaptado usado en este trabajo se puede comparar modos de vibración teóricos del análisis modal con los que aparece frente a una excitación determinada.

Con ello se extraen conclusiones que con los estudios de la FRF o el procedimiento original del MAC no se consigue obtener, como puede ser la aparición del 3º modo de vibración en la zona estática de la membrana.

Otra de las conclusiones que se ha llegado en este estudio es que usando una membrana elíptica se pueden obtener ciertos modos que no aparecen en las membranas circulares debido a su simetría radial. El mismo efecto ocurre al usar distintas orientaciones de la fuente de sonido, a 45º y 90º aparecen otros modos de vibración que no se observan con la orientación de 0º.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Por último la FRF realizada para los nodos del eje x de la membrana elíptica permite confirmar lo expuesto en el trabajo, se distinguen modos adicionales en el estudio de la membrana elíptica y al variar la orientación de la fuente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Camacho J., Garcia-Manrique J., Gonzalez-Herrera A. (2017). Numerical model to simulate the forward and reverse sound transmission mechanism in hearing. *MEDYNA 2017: 2nd Euro-Mediterranean Conference on Structural Dynamics and Vibroacoustics*. Sevilla. Spain.
- [2] Ewins, D.J. (1984). *Modal Testing: Theory and Practice*. England: Research Studies Press Ltd.
- [3] Gonzalez-Herrera A., Cheng J.T., Rosowski J.J. (2015). Analysis of the influence of the speaker position on the study of the dynamic behavior of a membrane combining holography technique and finite element models. *The 22nd International Congress on Sound and Vibration (IIAV)*. Florence. Italy.
- [4] Gonzalez-Herrera A., Garcia-Manrique J. (2018) Numerical study of the mechano-acoustic coupled resonance of a tube-membrane system. *Meccanica*,53(13), 3189-3207.
- [5] Gonzalez-Herrera A., Olson E.S. (2015). A study of sound transmission in an abstract middle ear using physical and finite element models. *J. Acoust. Soc. Am.*, 138(5), 2972–2985.
- [6] Howard C. Q., Cazzolato B. S. (2015). *Acoustic Analyses Using MATLAB and ANSYS*. United States: Taylor & Francis Group.
- [7] Pastor, M., Binda, M., Harcarik, T. (2012). Modal assurance criterion. *Procedia Engineering*, 48, 543–548.
- [8] Rivero A. (2017). *Estudio del comportamiento mecano-acústico de una membrana sometida a presión sonora*. Universidad de Málaga, Málaga.