

ESTUDIO DEL ACOPLAMIENTO VIBROACÚSTICO DE UNA ESTRUCTURA CILÍNDRICA VIBRANTE

PACS: 43.40.Ey

Picó Vila, Rubén; Roig Sala, Bernardino; Redondo Pastor, Javier
Escuela Politécnica Superior de Gandía. Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N. Grao de Gandía (Spain)
Tel: 962 849 300
Fax: 962 849 313
E-Mail: rpico@fis.upv.es

ABSTRACT

The question regarding the possible effect of structural resonances upon the tonal quality of a wind instrument remains a subject of debate. Some musicians and instrument-makers often state that the construction materials play an essential role in the acoustic quality of the instrument. However, it is very difficult to evaluate and quantify the effect of the material on its acoustic response. In this work, the finite element method (FEM) is used in order to analyse the modal behaviour and vibration of the instrument's body.

RESUMEN

La influencia del material de construcción de los instrumentos de viento en el comportamiento acústico de los instrumentos de viento es una cuestión que ha sido, y sigue siendo objeto de debate. Músicos y fabricantes de instrumentos a menudo afirman que los materiales de construcción juegan un papel esencial en su calidad. Sin embargo, hay numerosas dificultades para evaluar y cuantificar el rol del material de construcción del instrumento en su respuesta acústica. En este trabajo se utiliza el método de elementos finitos para analizar el comportamiento modal y la vibración del cuerpo del instrumento.

INTRODUCCIÓN

Los luthiers saben bien que el material de construcción de la caja de resonancia de los instrumentos de cuerda es un elemento muy importante a la hora de diseñar sus propiedades acústicas. En el caso de los instrumentos de viento, el mecanismo resonador fundamental es la columna de aire. Es mucho más importante la forma del cuerpo del instrumento que el material utilizado para su construcción. No obstante, el rol del material es un tema habitual de debate entre músicos, constructores de instrumentos y científicos.

A pesar de la abundante literatura científica en este campo, se siguen publicando trabajos en la actualidad relacionados con este tema. La principal dificultad que presentan estos estudios se debe a los problemas que presenta el análisis de la influencia del material en condiciones de interpretación real. Desde principios del siglo XX, se han realizado numerosos estudios acústicos con el objetivo de determinar la influencia del material de construcción de

instrumentos de viento en su comportamiento acústico. Cabe destacar entre ellos el trabajo de Nederveen y Dalmont [1] en el cual describen un fenómeno importante relacionado con el efecto de vibración de las paredes. Los autores estudian las autooscilaciones de un tubo de órgano de estaño con las paredes delgadas y con embocadura de flauta. Al hacer sonar el instrumento, observan fuertes inestabilidades en forma de batidos. El tubo de órgano utilizado presenta una particularidad geométrica: su sección transversal es ligeramente elíptica. Los autores atribuyen el comportamiento anómalo del tubo al acoplamiento vibroacústico producido entre la estructura deformada y el fluido interno.

Los defectos de ovalización, que existen siempre en la práctica, juegan, por tanto, un papel crucial al generar un acoplamiento adicional entre dos tipos de modos que estarían desacoplados en el caso de ausencia de defectos: el modo acústico plano y el primer modo de ovalización de la estructura.

MODELO PROPUESTO

En [2] se propone un modelo vibroacústico simplificado de instrumento para cuantificar de forma objetiva la importancia del fenómeno de vibración de las paredes en el sonido emitido por el instrumento. En dicho modelo, el cuerpo del instrumento se asimila a una estructura cilíndrica de paredes finas. El acoplamiento entre los modos de la estructura mecánica y los modos acústicos de la columna de aire (ver figura 1) se deduce a partir de un modelo vibroacústico analítico multimodal [3].

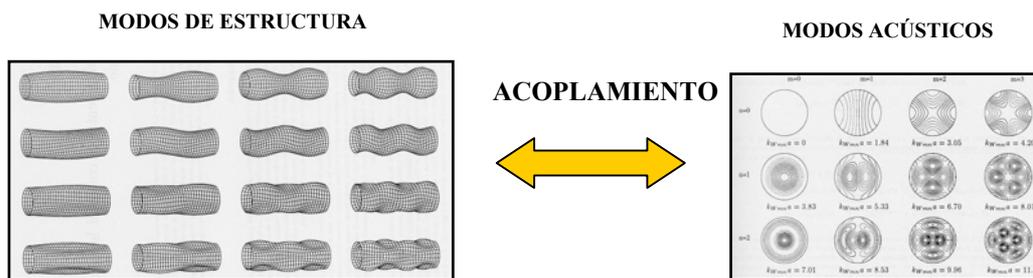


Figura 1: Acoplamiento vibroacústico entre modos de estructura y modos acústicos

El comportamiento acústico del cuerpo del instrumento (resonador) se puede describir por su impedancia acústica de entrada, sólo considerando la interacción entre el primer modo de respiración y el modo plano. El efecto de vibración de pared se puede evaluar como una corrección $(1+C)$ de la impedancia acústica de entrada de un resonador no vibrante (Z^f):

$$Z^r = Z^f(1 + C)$$

El factor de corrección de la impedancia describe el acoplamiento vibroacústico entre la estructura y la columna de aire. Éste depende de las propiedades físicas del material que de construcción del instrumento y de su geometría. Por tanto, si las características del instrumento son conocidas, la relación anterior permite cuantificar el efecto de vibración de las paredes.

Al considerar los materiales habituales de la construcción de instrumentos de sección cilíndrica se comprueba que el efecto auditivo de la vibración de paredes es despreciable. En efecto, el acoplamiento vibroacústico es tan débil que la impedancia de entrada del instrumento a penas se ve alterada y se comporta cómo si fuese un instrumento totalmente rígido.

DEFECTOS DE CIRCULARIDAD

A tenor de estos resultados anteriores, se puede decir que el material de construcción no parece tener ninguna influencia significativa en la calidad sonora del instrumento. Pero,

¿cómo se explica entonces el fenómeno de autooscilación anómalo observado por Nederveen y Dalmont con un tubo de órgano?

Tal y como describen los autores en [1], son los defectos de circularidad del tubo los responsables de la aparición del fenómeno de vibración de las paredes. Para explicar esta hipótesis en términos vibroacústicos, es preciso extender el modelo de instrumento descrito anteriormente para un instrumento cuyo cuerpo presenta una sección transversal ligeramente deformada. En el estudio vibroacústico de una estructura ligeramente ovalizada aparecen acoplamientos adicionales entre modos acústicos y modos de estructura que están inducidos por la imperfección de simetría del cilindro. En efecto, la presencia de un defecto provoca un acoplamiento entre el modo acústico plano y el primer modo oval de la estructura. Este acoplamiento resulta de gran importancia debido a que su frecuencia propia está próxima a las primeras frecuencias acústicas del tubo. Con lo cual, el comportamiento acústico del instrumento se ve alterado por la vibración inducida por la deformación de la estructura.

Teniendo en cuenta un valor fijo de los parámetros geométricos del cilindro, se demuestra que para valores suficientemente bajos del módulo de Young (E) y de densidad (ρ) el efecto de vibración de pared puede ser muy importante. Como consecuencia de esto, la impedancia acústica de entrada se puede ver considerablemente afectada.

CALCULO NUMERICO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método analítico propuesto permite explicar algunos de los fenómenos más importantes relacionados con el efecto de vibración de las paredes. Sobre la base del acoplamiento vibroacústico entre la estructura del instrumento y su columna de aire, se obtiene una expresión de la impedancia de entrada que permite describir y caracterizar el rol del material de construcción del instrumento en su comportamiento acústico. Esto supone un importante avance para la comprensión de este tipo de fenómenos. Sin embargo, cabe destacar que la geometría cilíndrica del instrumento propuesto es muy sencilla. La consideración de una geometría más complicada hace imposible la resolución analítica del problema. El análisis mediante el método de elementos finitos permite tomar en cuenta variaciones en la geometría como, por ejemplo, cambios de perfil, incluir agujeros o introducir una la bocina del final del instrumento. Un primer paso en esta dirección consiste en utilizar métodos numéricos para caracterizar el comportamiento modal del cuerpo del. Para ello resolver numéricamente el problema modal de la estructura sencilla.

La resolución numérica del problema de vibración in vacuo de la estructura mediante el método de elementos finitos se realiza en diversas etapas:

1) *Preprocesado*: definición de la geometría y de las condiciones de contorno. La tabla 1 muestra los parámetros físicos introducidos en la simulación del instrumento. Se ha elegido una estructura de acero con las dimensiones típicas de un clarinete.

Radio	14.25mm
Longitud	0.5m
Espesor	0.5mm
Densidad	7800kg/m³
Módulo de Young	210 N/m²

Tabla 1: Dimensiones y características del material simulado

2) *Procesado*: La resolución aproximada de las ecuaciones se realiza mediante su integración en diferentes elementos que constituyen una malla. Se ha definido una malla en la que los elementos son prácticamente paralelepípedicos. En la dirección longitudinal se ha dividido el resonador en 20 elementos y en sentido angular en 48, lo cual significa que la malla contiene 960 elementos (ver figuras)

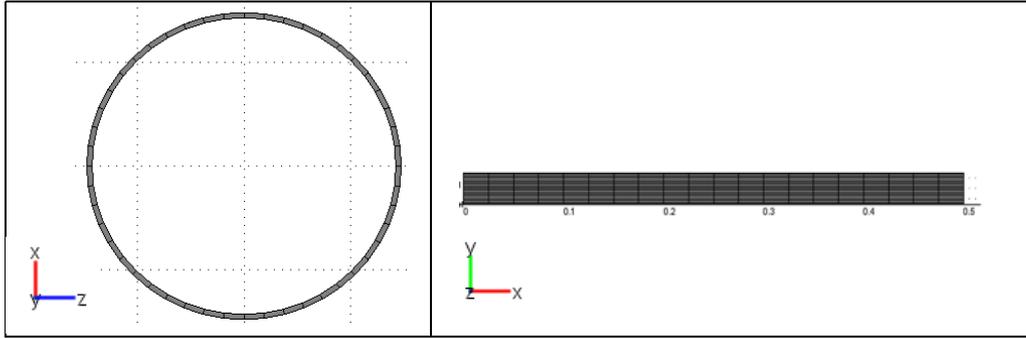


Figura 2a) y 2b) Vista frontal y lateral de la malla

3) *Post-procesado*: La resolución del problema proporciona las frecuencias propias calculadas de los distintos modos de la estructura obtenidos para unas condiciones de contorno particulares. Asimismo, se puede representar gráficamente la deformación de la estructura en esos modos.

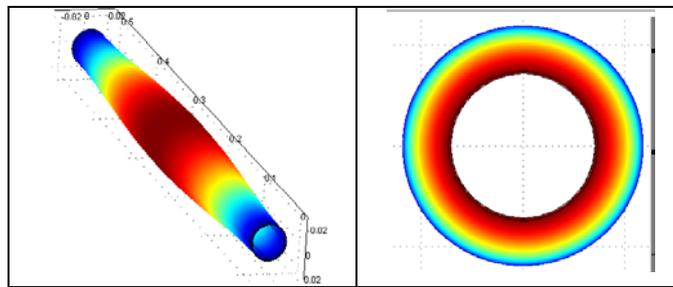


Figura 3a) y 3b): Estructura vibrando en el primer modo de respiración

Varios modos de la estructura están degenerados. El cálculo numérico por medio de elementos finitos es aproximado ya que la malla no es perfectamente cilíndrica. Por esa razón, se obtienen pares de valores frecuencias muy próximas para esos modos. A modo de ejemplo se ha representado en la figura 3a) y 3b) el primer modo de respiración de la estructura que presenta y en la figura 4a) y 4b) el primer modo de ovalización.

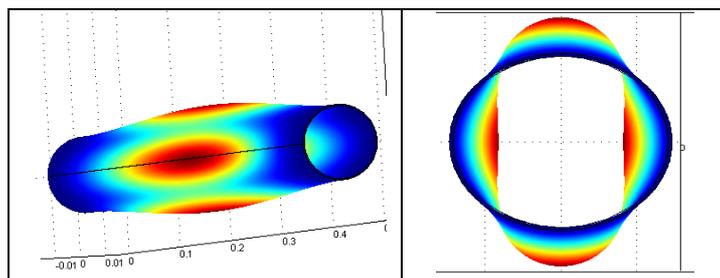


Figura 4a) y 4b): Estructura vibrando en el primer modo de ovalización

Los valores obtenidos mediante la simulación numérica para las frecuencias propias de la estructura son muy próximos a los obtenidos analíticamente mediante la resolución de la ecuación de la estructura homogénea con el operador de Donell [4]. En efecto, tal y como muestra la tabla 2, el error en el cálculo numérico para los dos modos es menor al 2%

Modo (m,q)	Frecuencia teórica (Hz)	Frecuencia MEF (Hz)	Error (%)
(0,1): 1 ^{er} de respiración	3194.4	3193.91	0.02
(2,1): 1 ^{er} de ovalización	1572	1599	1.7

Tabla 2: Comparación de las frecuencias propias de la estructura de los primeros modos de respiración y ovalización de la estructura.

Al considerar una estructura con una sección transversal ligeramente deformada, comprobamos que las frecuencias propias de la estructura cambian. En la tabla 3 se comparan las frecuencias propias de dos estructuras de dimensiones y materiales idénticos pero una de ellas con una deformación de la sección de un 5% de su radio. Todas ellas han sido estimadas numéricamente mediante el método de elementos finitos.

Modo (m,q)	Frecuencia propia de la estructura con sección cilíndrica (Hz)	Frecuencia propia de la estructura con sección oval (Hz)	Desviación(%)
(0,1): 1 ^{er} de respiración	3194	3098	3
(2,1): 1 ^{er} de ovalización	1599	1604/1618	0.3/1.2

Tabla 3: Comparación de las frecuencias propias de los primeros modos de respiración y ovalización de la estructura calculadas mediante el método de elementos finitos de una estructura con sección cilíndrica y una estructura con sección ligeramente deformada (sección oval).

La deformación de la estructura produce dos cambios significativos en la vibración y en su comportamiento modal:

- Las frecuencias propias cambian ligeramente: se puede observar en la tabla 3 que existe una ligera desviación asociado a la deformación de la sección transversal de la estructura.
- Los modos que estaban degenerados en la estructura cilíndrica, han perdido la degeneración y presentan frecuencias propias distintas. Es el caso del primer modo de ovalización. Tal y como muestra la tabla 3, la frecuencia propia de la estructura con sección cilíndrica es de 1599 Hz. Al deformar la estructura ese modo se separa en dos modos de diferente simetría con frecuencias propias diferentes: 1604Hz y 1618Hz.

CONCLUSIÓN

El comportamiento vibratorio del cuerpo de un instrumento puede influir en algunos casos en la acústica de la columna de aire que encierra. En particular, existen evidencias experimentales de instrumentos que, debido a defectos de la circularidad del cuerpo resonante presentan un comportamiento acústico significativamente anómalo. Dichas experiencias son, por tanto, indicadores de una posible influencia del material de construcción del instrumento de viento en su calidad sonora. El fenómeno físico que lo explica es el acoplamiento vibroacústico del cuerpo del instrumento y la columna de aire: es el denominado efecto de vibración de las paredes. El método de elementos finitos se ha utilizado para caracterizar el comportamiento vibratorio del cuerpo del instrumento simplificado: una estructura cilíndrica. El cálculo numérico muestra un buen acuerdo con el modelo teórico en el cálculo de las frecuencias propias de la estructura de sección cilíndrica. Además, permite caracterizar el comportamiento modal de estructuras deformadas y obtener la variación de las frecuencias propias introducidas por la deformación de la estructura.

REFERENCIAS

- [1] C. N. NEDERVEEN, J. P. DALMONT 2004 *Journal of Sound and Vibration* **271**, 227-239. Pitch and level changes in organ pipes due to wall resonances.
- [2] R. PICÓ VILA, J. GILBERT, F. GAUTIER. *Proceedings of the 7th CFA/DAGA*, Strasbourg, France, 22-25 March 2004. Study of the input acoustic impedance of a vibrating cylindrical shell: consequences on clarinet-like instrument. T. Van Renterghem, D.

Botteldooren *Numerical Simulation of the Effect of Trees on Downwind Noise Barrier Performance*. Acta Acustica united with Acustica. Vol. **89** (2003) 764 - 778

- [3] B. LAULAGNET 1995 *Euro-noise 95* proceedings, 363-373. Modal method in sound radiation problems: academic and more complicated cases.
- [4] A. LEISSA 1973 *Vibrations of shells*. The Acoustical Society of America.