

# ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SONORO DE LA DULZAINA

Poveda-Martínez Pedro<sup>1</sup>, Vera-Guarinos Jenaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante  
{pedro.poveda@ua.es, jenaro@ua.es}

## Resumen

La Dulzaina es un instrumento de viento tradicional enmarcado dentro de la familia del oboe. Se trata de un instrumento folclórico y por tanto, su uso se ciñe principalmente a la música popular. La dulzaina es un denominador común en actos o fiestas culturales de tipo local en un gran número de países. Sin embargo, tanto su nombre como su fisonomía se ven alterados en función del país de procedencia o la región. Un ejemplo claro lo encontramos dentro del territorio español, siendo un instrumento ligeramente diferente según la comunidad autónoma. En la actualidad, la Dulzaina se fabrica siguiendo el estándar tradicional de cada región en cuanto a posición y tamaño de las perforaciones realizadas en su estructura. En la mayoría de casos la afinación del instrumento presenta ciertas deficiencias, lo que obliga al intérprete a actuar de forma activa sobre la lengüeta para corregir el tono. En este trabajo se analiza la problemática existente en relación a la afinación del instrumento. Para ello se lleva a cabo un estudio de la impedancia acústica de la Dulzaina, verificando el tono obtenido en cada nota y estableciendo posibles soluciones que garanticen una mayor calidad sonora del instrumento.

**Palabras-clave:** Dulzaina, afinación, impedancia, instrumento musical

## Abstract

The Dulzaina is a traditional wind instrument framed within the Oboe family. It is a folk instrument and therefore, its use is limited mainly to popular music. Dulzaina is essential in local cultural events or festivals around the world. However, both its name and its appearance are modified depending on the country or region. A clear example is Spain, where the instrument varies slightly according to the autonomous community. Currently, the Dulzaina is manufactured following the traditional standard of each region in terms of position and size of the perforations made in its structure. In most cases, the tuning of the instrument has certain deficiencies, forcing the interpreter to act actively on the tongue to correct the tone. This work analyses the intonation of the instrument. To do this, a study of the acoustic impedance of different Dulzainas is carried out, verifying the tone obtained in each note and establishing possible solutions that guarantee a higher sound quality of the instrument.

**Keywords:** Dulzaina, intonation, impedance, musical instrument

**PACS no. 43.75.Ef**

## 1 Introducción

Actualmente existen numerosos estudios sobre el comportamiento sonoro de diferentes instrumentos musicales, especialmente los dedicados a la familia de viento. En este sentido, Nederveen [1] analiza

tanto los mecanismos de excitación de la columna de aire en el interior del instrumento como de la implicación de los orificios tonales en su afinación. Del mismo modo, Dalmont et al. [2] se centran en el análisis de la afinación de instrumentos de caña, mientras que Benade et al. [3] y Debut et al. [4] focalizan sus estudios en el efecto de los orificios tonales y analizando la corrección necesaria por el efecto de carga sobre el medio en distintos instrumentos. Así mismo, Plitnik et al. [5] determinan la impedancia acústica del Oboe a partir de subdivisiones más sencillas de su estructura.

Todos estos estudios permiten conocer más en profundidad el comportamiento de instrumentos que son empleados con asiduidad en grandes conjuntos orquestales. De esta forma, es posible mejorar su diseño para garantizar no solo una afinación apropiada, sino también una mejor sonoridad. Un claro ejemplo es el propuesto por Noreland et al. [6]. En este trabajo, los autores llevan a cabo la optimización del clarinete a partir de un modelo analítico basado en matrices de transferencia. A partir de la minimización de una función objetivo los autores proponen el perfil más apropiado para garantizar una correcta afinación del instrumento.

La mayoría de trabajos presentes en la literatura se centran en instrumentos de uso orquestal. Sin embargo, existen multitud de instrumentos de carácter folclórico sobre los cuales pueden aplicarse estos mismo principios. En algunos casos, la geometría y disposición del instrumento ha ido evolucionando con los años de forma espontánea, adaptando pequeñas mejoras planteadas por el propio instrumentista. A pesar de ello, su comportamiento acústico presenta ciertas deficiencias, las cuales podrían ser subsanadas a partir de una análisis detallado. Un de estos casos corresponde a la dulzaina, cuya interpretación requiere de una gran destreza por parte del músico para conseguir una correcta afinación en las notas.

La dulzaina es un instrumento aerófono formado por un tubo cónico, tradicionalmente de madera, a cuyo extremo superior se fija una lengüeta doble por medio de una pieza metálica denominada tudel o tundel [2] (ver figura 1). La caña se encargará de generar la excitación necesaria para interpretar las distintas notas musicales (figura 1). El intérprete, al insuflar aire por el extremo, provocará ligeros desplazamientos en las paredes de la caña, modificando la sección de entrada, que se abrirá y cerrará de manera rápida y repetida. Esta perturbación se transmitirá, a través del tudel (figura 2), a la columna de aire en el interior del instrumento, haciendo sonar la nota correspondiente según las resonancias del propio sistema.



Figura 1 – Caña y tudel. Ejemplo de unión entre ambos

La dulzaina es la variedad menos evolucionada del antiguo arquetipo del que se fueron derivando la chirimía, un poco más perfeccionada y variada en tamaños y tesituras, y el oboe, único de los instrumentos de lengüeta doble cuyo sonido logró entrar en la “gran música” debido al refinamiento de su timbre y a sus avanzados mecanismos técnicos de control de altura.

El tubo cónico de la dulzaina se divide en tres zonas: cubilete, cuerpo y campana. El cubilete es la parte donde se coloca el tudel con la caña. El cuerpo es la parte central del instrumento, donde se realizan una serie de orificios en su parte delantera y trasera que permiten interpretar diferentes notas musicales. La campana corresponde a la parte final, y actúa como bocina, amplificando de manera natural el sonido. En muchas ocasiones incorporan aros o abrazaderas colocados en la zona superior e inferior para sujetar el tubo.

La dulzaina, utilizada desde hace siglos para la interpretación de música popular en la mayor parte de la Península Ibérica, es la variedad más ruda y áspera de la familia de instrumentos de lengüeta doble, pero también la más potente. En función de la región de procedencia, el instrumento cambia de nombre e incorpora ciertas particularidades en su construcción, lo que da lugar por norma general a un cambio en la afinación.

A lo largo de este trabajo se analiza el comportamiento acústico de un tipo específico de dulzaina, la gralla. Para ello se empleó la impedancia acústica a la entrada del instrumento. El estudio se llevó a cabo de forma experimental, numérica y analítica, sentando las bases para una optimización del perfil del instrumento que garantice la correcta afinación del mismo.

## 2 Materiales y métodos

### 2.1 Muestra analizada

Este estudio se llevó a cabo sobre una dulzaina o gralla en SOL, cuyo origen corresponde a la región de Cataluña, en España. El instrumento presenta una forma principalmente cónica, con una sección recta a la entrada (diámetro de entrada, 11.6 mm) y una forma abocinada a la salida (ver figura 1). A lo largo del instrumento se sitúan diferentes orificios que, al ser taponados por el intérprete, modifican el comportamiento acústico del tubo y permiten la interpretación de diferentes notas musicales.

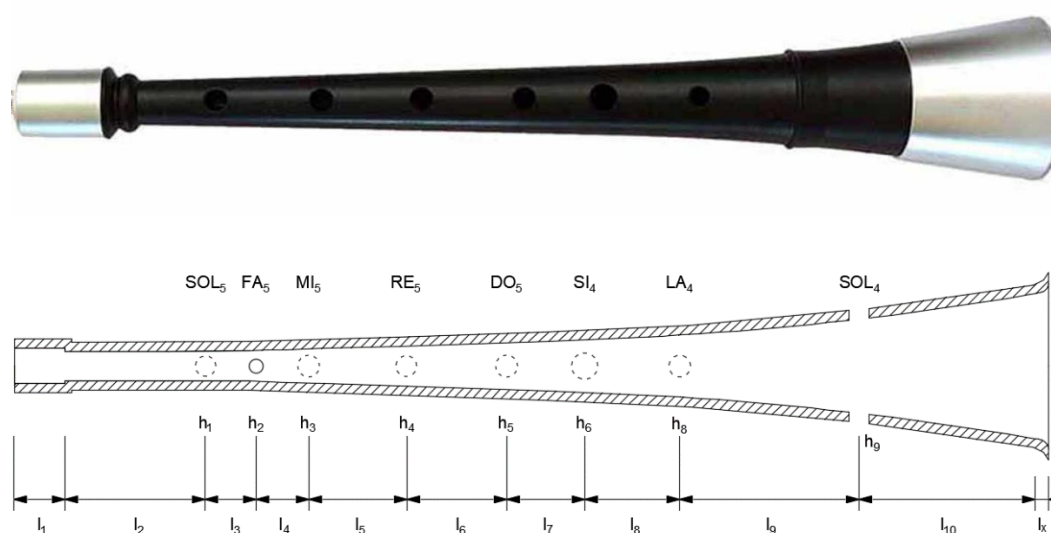


Figura 2 – Gralla SOL<sub>4</sub>, sección

Con objeto de facilitar el análisis del instrumento y realizar ensayos experimentales, tanto la caña como el tudel fueron eliminados de la gralla. Por tanto, únicamente se empleó la parte correspondiente al cuerpo mostrado en la figura 1. Esta modificación, como es lógico, consituye una alteración de la afinación del instrumento con respecto a las notas musicales esperadas. De acuerdo con [6], el conjunto caña-tudel, a efectos acústicos, representa un volumen de aire añadido a la columna interior del instrumento y por tanto, introducirá un desplazamiento frecuencial de los modos del tubo. De manera simplificada e ilustrativa, a lo largo de este trabajo se consideró como nota base del instrumento sin caña y tudel el primer modo propio obtenido para una digitación de SOL<sub>4</sub>. Considerando la escala temperada, los modos fundamentales teóricos correspondientes al resto de notas se calcularon como  $f_{\text{SOL}_4} \cdot 2^{1/12}$ .

## 2.2 Impedancia acústica

El análisis del comportamiento sonoro del instrumento se centró en la impedancia acústica de entrada. Para ello, en primer lugar, se llevaron a cabo medidas experimentales en tubo de impedancia. Asimismo, con objeto de facilitar posibles mejoras en el instrumento, se implementó un modelo numérico basado en elementos finitos y un modelo analítico por medio de matrices de transferencia.

### Caracterización experimental. Medidas en tubo de impedancia

Uno de los ensayos más comunes para determinar experimentalmente la impedancia acústica es el denominado método de la función de transferencia [8, 9]. Este procedimiento de medida es uno de los más extendidos en la caracterización acústica de materiales, y viene recogido en la normativa ISO 10534-2:2002 [10]. La Figura 3 muestra la configuración experimental empleada en este trabajo.

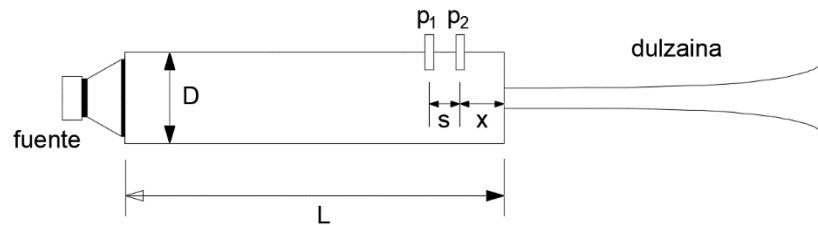


Figura 3 - Configuración experimental para la medición de la impedancia acústica según la normativa ISO 10534-2 [10].

El instrumento a caracterizar se colocó en el extremo del tubo. Mediante una fuente sonora situada en el extremo opuesto se generó un patrón de onda estacionaria. A partir de la señal de presión medida en dos posiciones distintas,  $p_1$  y  $p_2$ , separadas una distancia  $s$ , se obtuvo el coeficiente de reflexión de la gralla según (1).

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{j2kx_1} \quad (1)$$

donde  $H_{12} = p_2/p_1$  es la función de transferencia, y  $x_1$  es la distancia entre el micrófono más lejano a la muestra y ésta. De este modo, calculando el coeficiente de reflexión se obtuvo la impedancia acústica específica mediante la expresión (2):

$$\frac{Z}{\rho_0 c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (2)$$

Las medidas se llevaron a cabo empleando un tubo de impedancia de 25 mm de diámetro. Para garantizar un rango frecuencial amplio, entre 100 y 6000 Hz, se escogieron dos distancias entre micrófonos diferentes, 25 mm y 150 mm. Los resultados obtenidos para cada par de micrófonos se interpolaron posteriormente teniendo en cuenta los rangos de validez en cada caso.

### Modelo numérico

Se llevó a cabo un modelo numérico por el Método de Elementos Finitos (FEM). Considerando las paredes del instrumento completamente rígidas, se implementó un modelo acústico en el que únicamente se incluyó el volumen de aire interior de la gralla. Asimismo, para considerar la carga ejercida por el medio sobre la boca del instrumento, se introdujo un dominio semiesférico tal y como se muestra en la figura 4. El casquete exterior de dicha semiesfera se definió como PML (perfectly matched layer).

Para simplificar el modelo, se empleó una condición de contorno tipo impedancia a la salida de los orificios tonales. Puesto que el diámetro de cada orificio resulta sensiblemente inferior al diámetro del propio instrumento, se consideró dicha salida como un agujero en pantalla infinita, empleando por tanto una condición flanged pipe o tubo embridado.

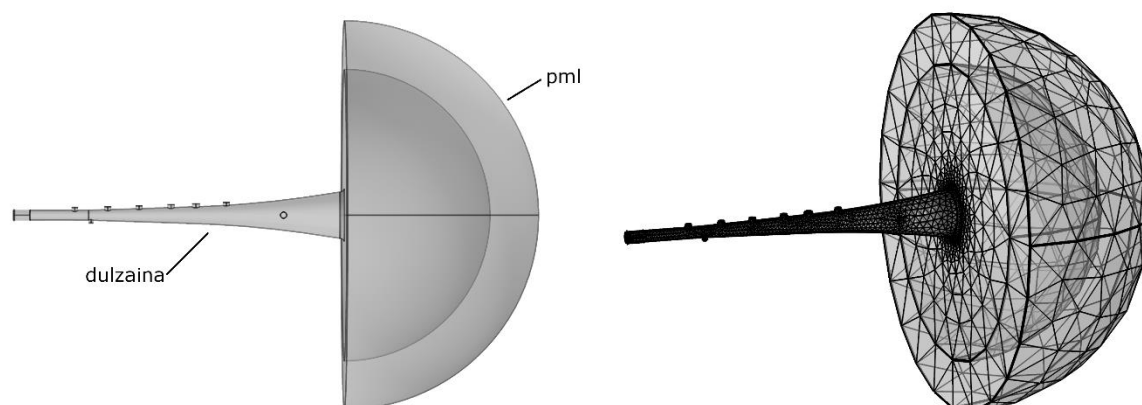


Figura 4 – Dominios incluidos en el modelo numérico FEM

### Modelo analítico

El modelado analítico de la gralla se llevó a cabo por el método de matrices de transferencia, considerando en todo caso la propagación de onda plano a lo largo de la sección del instrumento. Tal y como se muestra en la figura 1, el instrumento fue dividido en diferentes tramos, 24 en total, considerando cada uno de ellos como un elemento cilíndrico o cónico para simplificar la implementación del modelo. En la primera sección del tubo, las divisiones se llevaron a cabo para tramos entre orificios, mientras que en la zona de salida del instrumento, con un perfil de tipo exponencial, la división se realizó en elementos cónicos de longitud más pequeña, obteniendo una densidad de tramos mayor.

El comportamiento acústico de los tramos con perfil cilíndrico se describió empleando la matriz de transferencia indicada en (3).

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kL) & \frac{jZ_0}{S_2} \sin(kL) \\ \frac{jS_1}{Z_0} \sin(kL) & \frac{S_1}{S_2} \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

En el caso de tramos cónicos, se empleó la siguiente expresión:

$$T = \frac{x_2}{x_1} \begin{bmatrix} -t_2 \sin(kL - k\theta_2) & j \frac{\rho c}{S_2} \sin(kL) \\ j \frac{S_1}{\rho c} t_1 t_2 \sin(kL + k\theta_1 - k\theta_2) & t_1 \frac{S_1}{S_2} \sin(kL + k\theta_1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde  $S_1$  es el área transversal a la entrada de la bocina;  $S_2$  es el área transversal a la salida de la bocina;  $L$  es la longitud de la bocina ( $x_1-x_2$ );  $x_1$  es la distancia desde el vértice del cono a la garganta;  $x_2$  es la distancia desde el vértice del cono a la boca;  $k\theta_1 = \tan^{-1}(kx_1)$ ;  $k\theta_2 = \tan^{-1}(kx_2)$ ;  $t_1 = 1/\sin(k\theta_1)$ ;  $t_2 = 1/\sin(k\theta_2)$ .

Para la bifurcación correspondiente a los orificios tonales se consideró la siguiente expresión [6]:

$$T = \frac{1}{1 - \frac{Y_s Z_a}{4}} \cdot \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_s Z_a}{4} & Z_a \\ Y_s & 1 + \frac{Y_s Z_a}{4} \end{bmatrix} \quad (5)$$

siendo:

$$Y_s = \frac{1}{Z_s + Z_h} \quad (6)$$

Asimismo,

$$Z_a = j\omega m_a \quad (7)$$

$$Z_s = j\omega m_s \quad (8)$$

corresponden a las impedancias de las masas acústicas:

$$m_a = \frac{\rho t_a}{\pi a^2} \quad (9)$$

$$m_s = \frac{\rho t_s}{\pi b^2} \quad (10)$$

siendo:

$$t_a = b \cdot (-0.37 + 0.087\delta)\delta^2 \quad (11)$$

$$t_s = b \cdot (0.82 - 0.193\delta - 1.09\delta^2 + 1.25\delta^3 - 0.71\delta^4) \quad (12)$$

$$\delta = \frac{b}{a} \quad (13)$$

La impedancia de entrada correspondiente a los orificios,  $Z_h$ , se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Z_h = Z_0 \left[ \frac{Z_L \cos kL + jZ_0 \sin kL}{jZ_L \sin kL + Z_0 \cos kL} \right] \quad (14)$$

siendo  $Z_L$  la impedancia de radiación. Del mismo modo que en el modelo numérico implementado, para el caso de un orificio abierto al exterior cuyo tamaño sea notablemente inferior a las dimensiones del tubo principal, las paredes de dicho tubo se consideraron como una pantalla infinita, por lo que para valores de  $ka \ll 1$  se empleó la expresión (15):

$$Z_L = Z_0 \left[ \frac{1}{4}(ka)^2 + j0.82ka \right] \quad (15)$$

Para contemplar el efecto de carga del medio sobre el instrumento, se consideró un modelo de onda plana [11], calculando la impedancia acústica a la salida del tubo dada por la expresión:

$$Z_r(\omega) = Z_c \frac{1 + R}{1 - R} \quad (16)$$

siendo  $Z_c$  la impedancia característica del medio y:

$$R = -|R|e^{-2ikL} \quad (17)$$

$$|R(\omega)| = \frac{1 + a_1(ka)^2}{1 + (\beta + a_1)(ka)^2 + a_2(ka)^4 + a_3(ka)^6} \quad (18)$$

con  $a_1 = 0.8$ ,  $a_2 = 0.266$ ,  $a_3 = 0.0263$  y  $\beta = 0.5$ .

$$\frac{L}{a} = \eta \frac{1 + b_1(ka)^2}{1 + b_2(ka)^2 + b_3(ka)^4 + b_4(ka)^6} \quad (19)$$

con  $\eta = 0.6133$ ,  $b_1 = 0.0599$ ,  $b_2 = 0.238$ ,  $b_3 = -0.0153$  y  $b_4 = 0.00150$ .

Finalmente, el sistema correspondiente a la unión de varios componentes fue representado por el producto de las matrices de cada uno de los elementos:

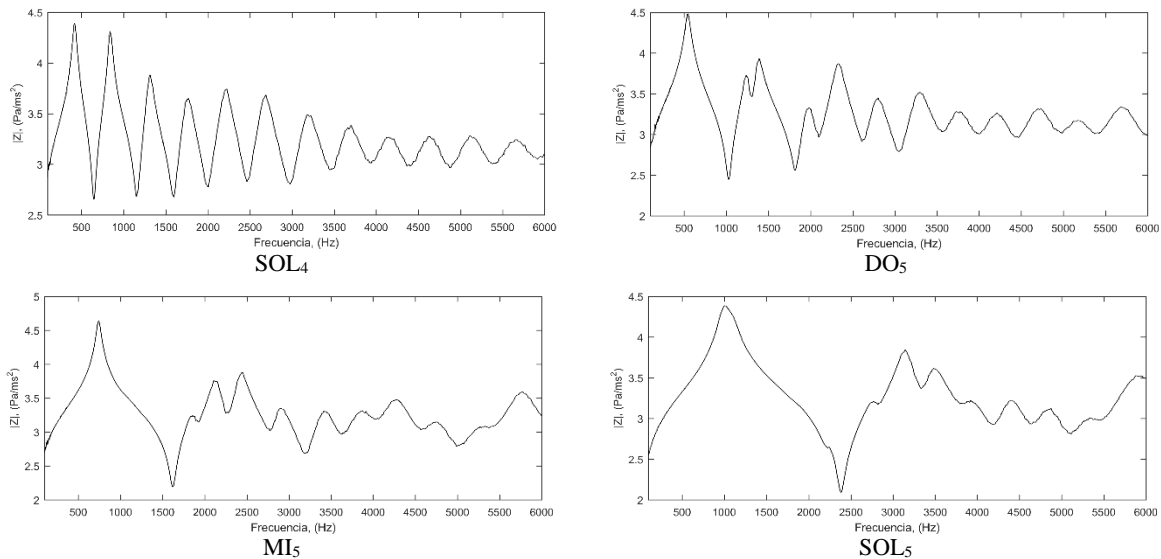
$$\begin{bmatrix} p_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot \dots \cdot T_n \cdot \begin{bmatrix} p_n \\ U_n \end{bmatrix} = T_{sistema} \cdot \begin{bmatrix} p_n \\ U_n \end{bmatrix} \quad (20)$$

Puesto que el tubo interior del instrumento y los orificio tonales no presentan una sección excesivamente reducida, tanto para el modelo numérico como para el analítico, no se consideraron relevantes las pérdidas por efectos viscotérmicos.

### 3 Resultados

#### 3.1. Medidas experimentales

La impedancia acústica obtenida a la entrada del instrumento para distintas configuraciones tonales se muestra en la figura 5. Como puede apreciarse, la riqueza espectral de la gralla se ve claramente deteriorada con el incremento en la frecuencia de la nota interpretada. Así, para una configuración de orificios propia de una nota MI<sub>5</sub>, únicamente es posible distinguir con claridad el armónico fundamental.



\*Cada figura corresponde a la configuración de agujeros necesaria para obtener la nota teórica indicada  
 Figura 5 – Impedancia acústica a la entrada de la gralla para diferentes posiciones de agujeros

Como se indicó en la sección anterior, debido a la inexistencia de caña y tudel, la impedancia acústica de la muestra analizada presentará un desplazamiento en frecuencia. Considerando la posición de SOL<sub>4</sub> como nota base del instrumento, se calcularon el resto de frecuencias para intervalos de  $2^{1/12}$  Hz. La tabla 1 muestra las frecuencias esperadas y obtenidas para las distintas combinaciones de orificios. Las diferencias existentes en ambos casos resultaron notables, poniendo de manifiesto las deficiencias la afinación del instrumento.



Notas	SOL <sub>4</sub>	LA <sub>4</sub>	SI <sub>4</sub>	DO <sub>5</sub>	RE <sub>5</sub>	MI <sub>5</sub>	FA <sub>5</sub>	SOL <sub>5</sub>
Frecuencia esperada, Hz	419.9	471.3	529.0	560.5	629.1	706.2	748.1	839.8
Frecuencia real, Hz	419.9	454.9	502.0	539.7	621.8	741.5	823.6	1009.0

Por norma general, estas diferencias son corregidas in-situ por el intérprete, existiendo diferentes estrategias para alcanzar la tonalidad deseada en cada caso: posición de lengua, presión sobre la caña, volumen de la caña en el interior de la cavidad bucal, etc. Sin embargo, resultaría útil rediseñar el instrumento de forma que su utilización no requiriese de técnicas adicionales. Para facilitar este proceso, se hace indispensable el uso de modelos a partir de los cuales sería posible la optimización del perfil de la gralla.

### 3.2. Comparación con los modelos

A continuación, se muestra una comparación de la impedancia acústica de entrada al instrumento obtenida de forma experimental, numérica y analítica. Como puede apreciarse, tanto los resultados con FEM como el uso de matrices de transferencia dan unos resultados satisfactorios, siendo el proceso de cálculo menos costoso en este último caso (3 min y 0.5 s respectivamente). Cabe destacar que en ningún caso se incluyeron pérdidas en el modelo, razón por la cual la amplitud para las frecuencias de resonancia difiere ligeramente con respecto al resultado experimental.

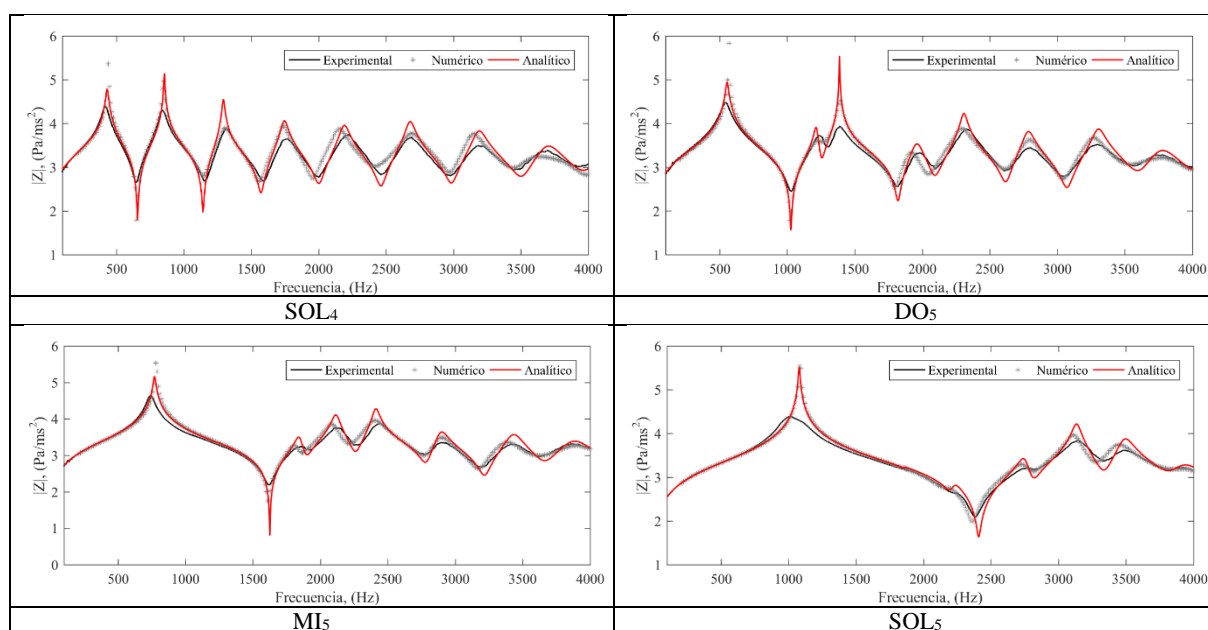


Figura 6 – Comparación de resultados experimentales, numéricos y analíticos

De esta forma, podríamos establecer como variables del modelo el perfil del instrumento (sección en cada punto a lo largo de su longitud), la posición de los orificios tonales, así como su diámetro y su longitud; y optimizar la impedancia de entrada para garantizar una mayor facilidad a la hora de interpretar los sonidos.

## 4 Conclusiones

A lo largo de este trabajo se analizó el comportamiento acústico de la dulzaina o gralla catalana de manera experimental, estableciendo a su vez los modelos numéricos y analíticos correspondientes.

Como se observa en los resultados, la afinación del instrumento dista mucho de lo esperado, exigiendo un esfuerzo extra al intérprete para corregir las derivas en frecuencia de las distintas notas. Asimismo, se observa una composición armónica pobre para notas altas, algo que sin duda tendrá un efecto notable en el timbre del instrumento.

Los modelos implementados, pese a no incluir pérdidas por efecto térmico o viscoso, proporcionan unos resultados satisfactorios, lo que permitirá optimizar la afinación del instrumento a partir de la modificación de sus características principales: sección y longitud del tubo; posición y diámetro de los orificios tonales.

## Referencias

- [1] Nederveen, C. J. *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Frits Knuf. 1969.
- [2] Dalmont, J. P.; Gazengel, B.; Gilbert, J.; Kergomard, J. *Some Aspects of Tuning and Clean Intonation in Reed Instruments*. *Applied Acoustics*. 46 (1995), 19-60.
- [3] Benade, A. H. ; Murday, J. S. *Measured End Corrections of Woodwind Tone-Holes*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 41 (1967), 1609.
- [4] Debut, V.; Kergomard, J.; Laloë, F. *Analysis of the effect of the register hole on the tuning of a clarinet*. 2003.
- [5] Plitnik, G. R. ; Strong, W. J. *Numerical method for calculating input impedance of the oboe*. *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 3 (1979).
- [6] Noreland, D.; Kergomard, J.; Laloë, F.; Vergez, Ch.; Guillemain, P.; Guilloteau, A. *The logical clarinet: numerical optimiation of the geometry of woodwind instruments*". *Acta Acustica united with Acustica*. 99 (2013), 615-628.
- [7] Manzano, M. "Dulzaina, gaita y flauta, tres instrumentos populares". *Breve estudio introductorio a una colección de "Músicas nuevas para instrumentos viejos"*. 2009.
- [8] Chung, J. Y. and Blaser, D. A. (1980a) *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory*. *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (3), 907-913.
- [9] Chung, J. Y. and Blaser, D. A. (1980b) *Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. II. Experiment*. *J. Acoust. Soc. Am.* 68 (3), 913-921.
- [10] ISO 10534-2: (1998) *Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method*.
- [11] Eveno, P.; Dalmont, J. P.; Caussé, R.; Gilbert, J. *Wave Propagation and Radiation in a Horn: Comparison Between Models and Measurements*. *Acta Acustica united with Acustica*. 98 (2012), 158-165.