

FÍSICA DE LA FLAUTA TRAVERSA

Alumnos: Garbarz, Alan; Martínez Gazoni, Rodrigo

Docentes: Lemmi, Claudio; Mazzaferri, Javier; Villarreal, Mirta

Asignatura: Laboratorio 2, Depto. Física, FCEN, UBA

Fecha: Noviembre de 2003

RESUMEN

En este trabajo se estudia la generación de ondas estacionarias en el caño de una flauta travesa comercial; analizando la posición de los nodos de dichas ondas para distintas digitaciones convencionales. Se estudia la dependencia frecuencial de las posiciones de los nodos y en consecuencia la longitud de la onda estacionaria. Se establece la frecuencia de corte para el instrumento analizado.

INTRODUCCIÓN

Los orificios de los instrumentos de viento brindan la posibilidad de forzar presión atmosférica dentro del tubo del instrumento, y así inducir la formación de nodos de presión. La posición de los mencionados nodos - a condiciones de contorno fijas - determinan la longitud de la onda estacionaria producida, y en consecuencia la nota musical producida.

La flauta travesa es un tubo de diámetro interno constante en toda su extensión (unos 19 +/- 0.5 mm) excepto en la cabeza, donde presenta una leve conicidad, prácticamente despreciable. A lo largo del cuerpo presenta orificios de diámetro constante (unos 15 +/- 1mm) y distribución no uniforme. El extremo alejado de la embocadura está completamente abierto, mientras que la embocadura en sí misma es un orificio mas pequeño que el flautista cubre en distinta proporción al excitar las distintas notas.

Es de esperarse, entonces, que la flauta travesa se comporte como un tubo cuyas condiciones de contorno no están del todo definidas, ya que si bien uno de los extremos es indudablemente abierto, el diámetro del otro es mas pequeño que el diámetro del caño y su posición es tangencial al mismo y no concéntrico (Figura 1).

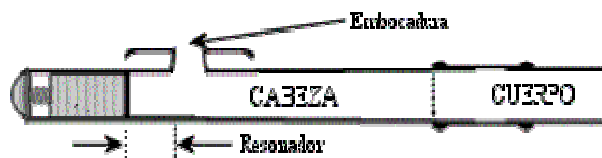


FIGURA 1. Detalle de la cabeza y embocadura de la flauta travesa (corte longitudinal).

Por otro lado, algunas consideraciones deben realizarse en lo que respecta al extremo de la embocadura: como se muestra en la Figura 1, el orificio de excitación no se encuentra exactamente en el extremo de la flauta sino corrido unos 17 mm hacia el cuerpo de la misma. Esta distancia, utilizada por los flautistas para mantener afinada la flauta en todo su registro, actúa como un resonador de Helmholtz, que representa una impedancia capacitiva en paralelo al

caño, mientras que los orificios abiertos representan una impedancia inductiva muy baja (shunt). Vemos que es evidente la dependencia frecuencial del comportamiento de la flauta travesa, ya que a bajas frecuencias la impedancia de los shunts (orificios destapados) es baja, con lo cual los nodos se formarán con relativa sencillez, sin embargo cuando se exciten frecuencias elevadas, la impedancia correspondiente a los orificios abiertos será mayor, por lo cual la onda "no notará" los primeros orificios y continuará mas allá de estos.

El flautista puede excitar distintos modos de la flauta, variando la dirección y la presión de la columna o jet de aire que envía hacia el filo de la embocadura y combinando esto con leves rotaciones del instrumento.

Normalmente pueden excitarse sin problemas los 5 primeros modos, siendo los modos convencionales de ejecución, los tres primeros.

DESARROLLO

Para la realización de esta experiencia se utilizó como objeto de estudio una flauta travesa comercial Yamaha 211 SII, con cola en DO. Se contó con un micrófono piezoeléctrico montado en una varilla de bronce graduada, de unos 75cm de largo y 4mm de diámetro, con el cual se permitieron obtener registros de presión dentro del instrumento, sin introducir variaciones en el sonido producido por el instrumento.

La disposición de los elementos fue sencilla y se describe en la Figura2.

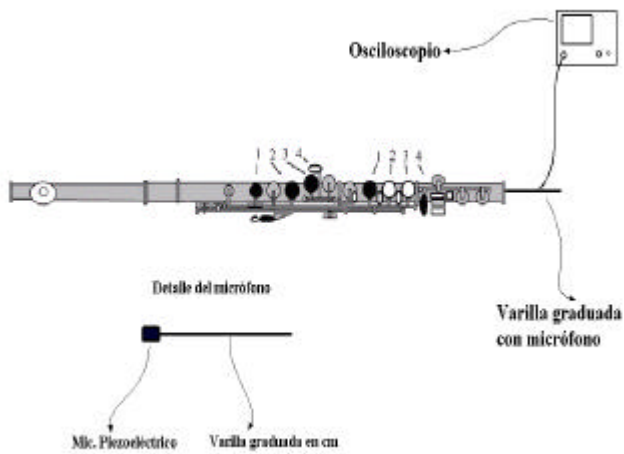


FIGURA 2. Disposición de los instrumentos para al medición de nodos.

Como primer objetivo se determinaron las condiciones de contorno del instrumento. Para esto se excitó el modo fundamental con una digitación tal que todos los orificios estaban tapados mientras que con el micrófono en el interior del instrumento se hacía un “barrido” en busca de nodos. Posteriormente se repitió el procedimiento, excitando ahora el segundo modo de la misma digitación y nuevamente se buscaron nodos.

Determinadas las condiciones de contorno, se buscó excitar los tres primeros modos, con las nueve primeras digitaciones convencionales, analizando la posición de los nodos para cada combinación modo – digitación, con el fin de hallar alguna relación entre éstas.

La configuración de la experiencia fue la misma que en el caso anterior: el micrófono, conectado al osciloscopio fue desplazado a lo largo del interior de la flauta, mientras ésta era excitada en un modo y digitación particular y se medía mediante la graduación de la varilla las posiciones del micrófono donde se observaban nodos de presión en el osciloscopio. El error en la medición de la longitud fue estimado a partir del mínimo desplazamiento necesario para observar un cambio evidente en la presión registrada en el osciloscopio. Dicho error fue de ± 1 cm.

Este procedimiento se repitió para cada una de las nueve primeras digitaciones convencionales. Es importante tener en cuenta que las digitaciones en cuestión son secuenciales, es decir cuando se destapa un nuevo orificio, todos los orificios por debajo de éste (es decir, entre el primero destapado y el extremo no excitado) ya se encuentran destapados y todos los que se encuentran encima (entre la embocadura y el primer orificio destapado) están tapados. Con esta forma de digitación se eliminan las digitaciones cruzadas y es la usada tradicionalmente para la primer octava de la flauta travesa.

RESULTADOS

Los resultados del análisis de las condiciones de contorno se observan en la Figura 3.

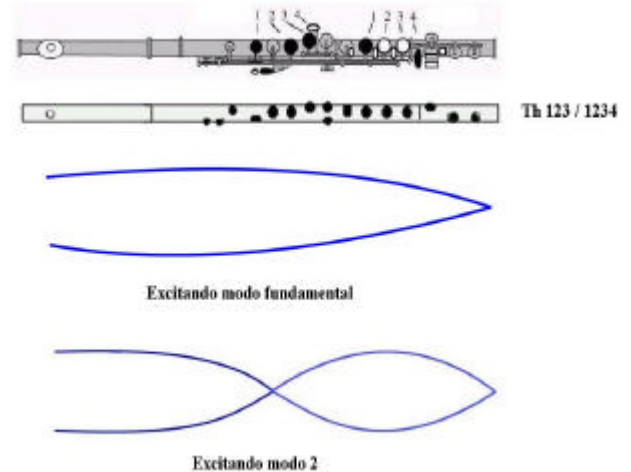


FIGURA 3. Caracterización de las condiciones de contorno de la flauta travesa, excitando modo fundamental y primer armónico.

Las posiciones de los nodos y de los orificios del instrumento están a escala. En la parte superior se agrega el esquema de la flauta con el sistema de llaves (para identificar las posiciones de los dedos) y abajo sólo con los orificios. Los círculos oscuros corresponden a orificios tapados y los círculos claros corresponden a orificios destapados

Se observa de la Figura 3 que la embocadura en el primer modo parece comportarse como un extremo cerrado, debido a que se observa un máximo de presión. Esto no es así ya que, como se observa en el segundo modo, hay un vientre comprendido entre el nodo correspondiente al extremo abierto y el nodo central, y este nodo central se encuentra justo en la mitad de la distancia entre los dos extremos. De todo esto podemos asegurar que la embocadura es un extremo abierto, pero que allí hallamos un máximo de presión debido a que está siendo excitada constantemente por el flautista, por lo que no se puede esperar otra cosa.

Este mismo comportamiento se observó en todas las digitaciones y todos los modos excitados, exceptuando el tercer modo, donde el micrófono en la embocadura no permitía su excitación.

Una vez determinadas las condiciones de contorno, que fueron coincidentes con las obtenidas por Simth y Wolfe [1], se apuntó a obtener las posiciones de los nodos al excitar los tres primeros modos, con las nueve primeras digitaciones convencionales.

En la Figura 4 se presentan los resultados obtenidos para las nueve digitaciones en el primer modo de excitación. Se agregan los esquemas de la flauta con cada digitación y su nomenclatura usual.

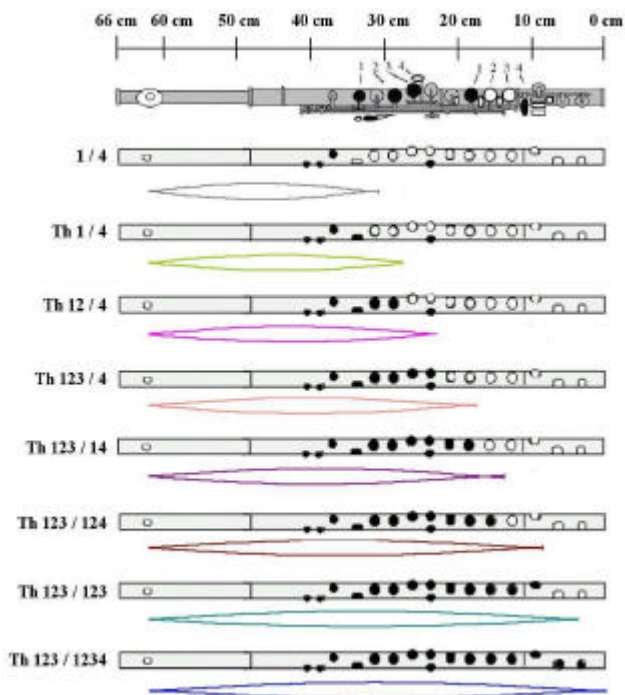


FIGURA 4. Resultados obtenidos para la medición de la posición de nodos en las nueve digitaciones, excitando el modo fundamental. En la parte superior se agrega el esquema de la flauta con el sistema de llaves (para identificar las posiciones de los dedos) y abajo sólo con los orificios. Los círculos oscuros corresponden a orificios tapados y los círculos claros corresponden a orificios destapados

Cabe aclarar que, si bien los esquemas de la flauta y las posiciones de los nodos de las figuras están a escala, los vientres de las ondas fueron estimados mediante programas de computación a partir de la posición de los nodos, ya que su medición se tornó prácticamente imposible dada la importante variación de la amplitud de la onda. Sin embargo en la experiencia se observaba un aumento y disminución de la amplitud registrada por el micrófono que se ajusta muy bien a los gráficos aproximados.

Por otro lado es importante aclarar que los nodos que encontramos no fueron verdaderos nodos de amplitud nula, sino importantes caídas de presión, donde ésta casi se anulaba.

En la Figura 4 podemos observar como los nodos que determinan el fin de la onda estacionaria “se corren” a medida que se destapan los orificios y que si bien su posición no coincide con la posición del primer orificio destapado, todos coinciden con la posición del primer orificio por debajo del orificio destapado. Dicho en otras palabras, para el modo fundamental, los nodos “saltan” un orificio.

A continuación se presentan los resultados correspondientes a la medición de las posiciones de los nodos al excitar el segundo modo. (Figura 5)

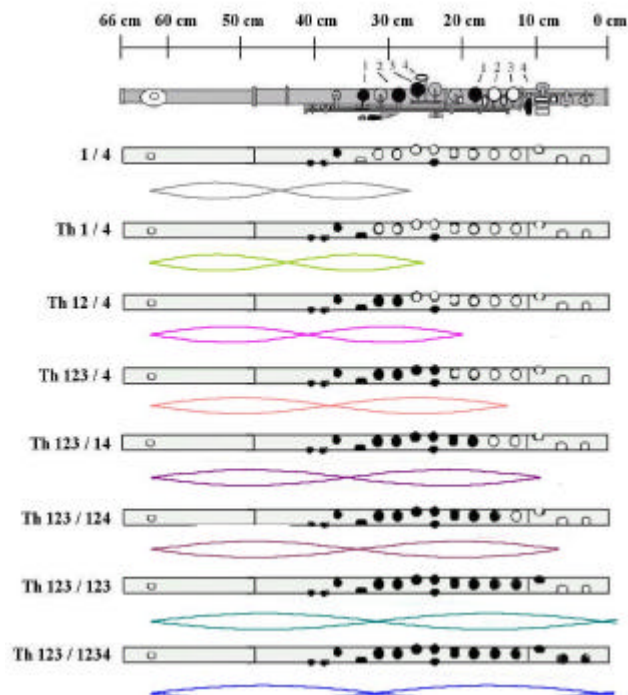


FIGURA 5. Resultados obtenidos para la medición de la posición de nodos en las nueve digitaciones, excitando el segundo modo. En la parte superior se agrega el esquema de la flauta con el sistema de llaves (para identificar las posiciones de los dedos) y abajo sólo con los orificios. Los círculos oscuros corresponden a orificios tapados y los círculos claros corresponden a orificios destapados

En la excitación del segundo modo (Figura 5) puede verse también el corrimiento de los nodos a medida que se destapan los orificios, acercándose cada vez más a la embocadura. Esto puede verse como que se acorta la longitud efectiva de la flauta, puesto que al medir por debajo del último nodo, la presión es casi constantemente nula.

En el caso del segundo modo puede verse que ahora el corrimiento del último nodo respecto al primer orificio destapado corresponde a un salto de dos orificios, y no de uno como sucedió para el modo fundamental.

Podemos ver también que la ubicación del nodo central es exactamente la mitad de la distancia entre los nodos de los extremos en cada una de las digitaciones.

Finalmente presentamos el caso del tercer modo (Figura 6)

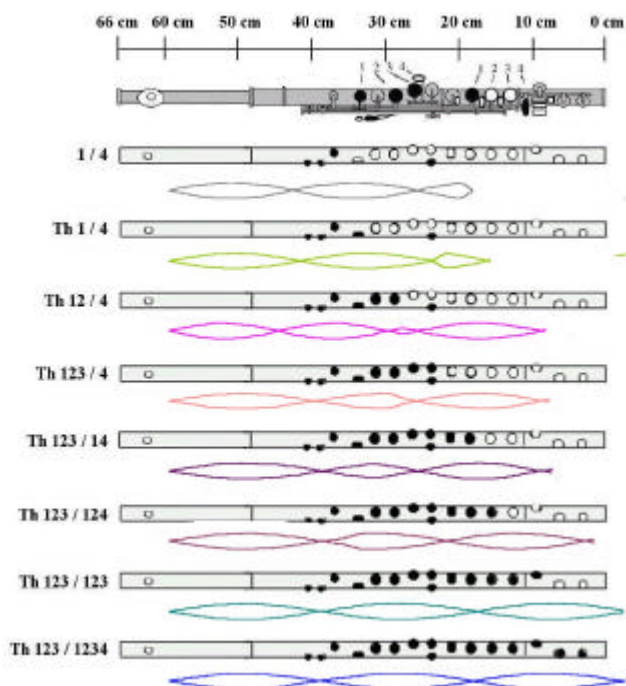


FIGURA 6. Resultados obtenidos para la medición de la posición de nodos en las nueve digitaciones, excitando el tercer modo. En la parte superior se agrega el esquema de la flauta con el sistema de llaves (para identificar las posiciones de los dedos) y abajo sólo con los orificios. Los círculos oscuros corresponden a orificios tapados y los círculos claros corresponden a orificios destapados

En este caso observamos que para las primeras digitaciones, la flauta continúa comportándose en la forma anterior, es decir, los nodos del extremo alejado de la embocadura tienen un corrimiento de tres orificios respecto al primero destapado, y las distancias entre nodos son casi idénticas y de un tercio de la distancia entre los nodos de los extremos. Sin embargo esto no sucede en las siguientes digitaciones, donde el comportamiento se vuelve errático, la posición de los nodos del extremo no parece seguir relación alguna y los nodos no se encuentran equidistantes entre sí. Este punto es el denominado frecuencia de corte, a partir de la cual el comportamiento del instrumento ya no es "lineal". Este fenómeno se debe a que la frecuencia aumentó lo suficiente como para que el efecto del "resonador de Helmholtz" de la cabeza de la flauta cobre mayor importancia, así como la impedancia de los orificios (que vemos que a frecuencias mayores aumenta, haciendo que los nodos se desplacen) e incluso la impedancia misma de la embocadura comienza a cobrar un papel preponderante [2]

La frecuencia a partir de la cual el comportamiento ya no es lineal es, en nuestro caso, la correspondiente al rango entre la tercera y quinta digitación, excitando el tercer modo, la cual corresponde aproximadamente a la nota D6, alrededor de 1.2Khz +/- 0.56 Khz (donde el error corresponde a la variación de frecuencias entre la tercera y quinta digitación), valor que coincide (considerando el error) con el del modelo teórico de Benade [1] y [3] de 2 +/- 0.5 Khz.

CONCLUSIONES

Pudimos determinar que las condiciones de contorno para la flauta travesera corresponden a extremos abiertos, aún cuando hallamos máximos de presión

en el extremos de la embocadura. Este máximo se debe a que el extremo se encuentra constantemente excitado, por lo que es de esperar no hallar nunca un nodo de presión. No obstante al analizar modos superiores al fundamental, vemos que los nodos se encuentran equidistantes, y si "extendemos" las curvas de presión hallaremos un nodo en la embocadura.

Pudimos comprobar también que los nodos correspondientes al final del tubo se "corren" hacia la embocadura a medida que se destapan los orificios, no afectando el sonido si se cortara el caño por debajo del último nodo. Este último punto lo comprobamos al retirar la cola de la flauta (lo que equivale a cortar el caño) y destapando orificios por encima de la misma, al soplar en esta forma (sin la cola) se oía la misma nota que cuando la colocábamos.

Comprobamos que la posición de los nodos del extremo más alejado de la boquilla depende de la frecuencia de excitación. Obtuvimos que los nodos caen un orificio por debajo del primero destapado, en el modo 1, dos orificios por debajo del primero destapado, en el modo 2 y tres orificios por debajo en las primeras digitaciones del modo 3.

Este fenómeno es justificado por Smith [1] diciendo que la impedancia acústica de la flauta es del tipo inductiva, por lo que aumenta con la frecuencia. Esto se traduce en que la onda "no se da cuenta" que hay orificios abiertos en frecuencias altas.

Vimos que a frecuencias muy altas el comportamiento ya no es lineal, entrando en juego el resonador de Helmholtz que se encuentra a la izquierda de la embocadura [2].

Finalmente pudimos hallar la frecuencia de corte (aquella a partir de la cual el comportamiento de la flauta no es "lineal") correspondiente, en nuestro caso, a una frecuencia de alrededor de 1.2Khz +/- 0.56 Khz (donde el error corresponde a la variación de frecuencias entre la tercera y quinta digitación), valor que coincide (considerando el error) con el del modelo teórico de Benade [1] y [3] de 2 +/- 0.5 Khz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Claudio Lemmi, Javier Mazzaferri, Mirta Villarreal y María Luz Martínez Ricci por su apoyo y paciencia.

REFERENCIAS

- [1] Joe Wolfe and John Smith . *Cut off frequencies and cross fingerings in baroque, classical and modern flutes*. J. Acoust. Soc. America, in press
- [2] Joe Wolfe and John Smith . *The effects of placement of the head joint stopper on the impedance spectra of transverse flutes*. The Eighth Western Pacific Acoustic Conference, Melbourne, Australia, 7-9 April 2003
- [3] A.H.Benade. *Fundamentals of Musical Acoustics*. Oxford Univ. Press, NY,1976