

Aproximación a la acústica del clarinete



Vicente Pastor García
Conservatorio Sup. de Música "Joaquín Rodrigo" de Valencia.
Instituto Superior de Enseñanzas Artísticas de la
Comunidad Valenciana (ISEACV).
C/ Cura Femenia, 1-19^a 46006 Valencia
vicentepastor@iseacv.es

PACS 43.75.Pq

Resumen

El clarinete es el único instrumento de la familia de las maderas que se comporta acústicamente de forma diferente al resto de sus homólogos, lo que constituye su particular excelencia que lo convierte en el instrumento más interesante desde el punto de vista acústico. Aunque se ha desarrollado empíricamente, en los últimos años las nuevas tecnologías y los innovadores medios que aporta la física han incentivado la investigación científica sobre la acústica del clarinete por parte del músico y el físico, lo que ha contribuido a avanzar significativamente en este campo. Estos trabajos se centran en el diseño de un clarinete ideal mediante la acústica lineal. Sin embargo, la descripción lineal es muy útil para predecir la afinación en niveles sonoros bajos, pero no es tan eficaz para niveles sonoros altos debido a la no linealidad que el sistema ofrece. El objetivo principal de estas investigaciones científicas se centra en encontrar un método para calcular las posiciones idóneas y el tamaño de los orificios tonales que deben dar las frecuencias armónicas, así como diseñar mecanismos que eviten ciertas disfunciones acústicas, lo que se consigue parcialmente.

El objetivo del artículo persigue aproximar al músico a la comprensión de la acústica del clarinete y sus posibilidades sonoras. Para ello, se describe el funcionamiento acústico del instrumento y se analizan y discuten los factores que intervienen en su calidad tonal.

Abstract

The clarinet is the only woodwind instrument that behaves acoustically in a different way respect the rest of its peers,

which is its particular excellence and makes the instrument to be more interesting from the point of view of sound. Although it has been developed empirically in recent years, the Physics has provided new technologies and innovative approaches that have encouraged scientific research on the clarinet acoustics by Musicians and Physicists, having contributed therefore to significant progress in this field. These studies focus on designing an ideal clarinet by linear acoustics. However, the linear description is very useful for predicting the pitch at low levels of sound, but it is not so effective in higher levels of sound due to the nonlinearity that the system offers. The main objective of this scientific research focuses on finding a method for calculating the appropriate position and size of tone holes which generate the harmonic frequencies, as well as to devise mechanisms to avoid certain acoustic malfunctions, which is partially achieved.

The aim of the article attempts to facilitate the Musician in the understanding of the clarinet acoustics and its sound possibilities. To this end, I describe the acoustic operation of the instrument and analyze and discuss the factors involved in its tonal quality.

1. Introducción

Por su especial funcionamiento acústico, su particular diseño y la naturaleza de las columnas aéreas, el clarinete se halla sometido a determinados fenómenos físicos que reducen ligeramente su rendimiento acústico. Así, la afinación perfecta y el timbre homogéneo en el clarinete son pura teoría. El reto de los fabricantes en las últimas décadas se ha

dirigido a precisar con exactitud las frecuencias del modelo ideal. Para ello es preciso corregir ciertas desviaciones que se producen por el uso de un solo orificio de registro, su funcionamiento de tubo cerrado y el efecto de la corrección del extremo abierto del tubo al que va asociado el uso de los orificios tonales. En el clarinete, la cooperación entre las frecuencias resonantes -la base de un tono musical- se ve contaminada por estos y otros factores de muy diversa índole. La magnitud e influencia en el proceso sonoro de algunos de ellos no se conoce todavía con precisión, todo lo cual dificulta enormemente la caracterización y el modelado del instrumento acústicamente perfecto.

Aunque los avances en un campo que se antoja vasto han sido notables, varias preguntas permanecen todavía sin respuesta. Se admite que la cuestión fundamental en el perfeccionamiento de los instrumentos de viento-madera radica en el diámetro y espaciado de los orificios tonales y en determinar todas las correcciones posibles debido a las desviaciones del modelo geométrico ideal. Especialmente en el clarinete esta cuestión es más ostensible debido, por una parte, a su particular funcionamiento de tubo cerrado, y por otra, a las alteraciones de su tubo. En este instrumento se necesita perforar más orificios que en otros instrumentos para cubrir el primer registro, lo que conlleva un estudio más exhaustivo y complejo de las posiciones idóneas. Se ha comprobado, asimismo, que a partir de un cierto tamaño de orificio tonal los instrumentos no pueden emitir frecuencias precisas debido a las pérdidas que se producen. Asimismo, también se ha observado que, en ocasiones, un orificio pequeño actúa como si estuviese cerrado debido al fenómeno del efecto del extremo abierto del tubo.

En los últimos años se ha experimentado un considerable avance con el uso de la impedancia de entrada en el instrumento. Esta herramienta ha supuesto un gran avance para el estudio y optimización de la calidad tonal del instrumento dado que permite observar las colaboraciones entre las frecuencias resonantes y, por tanto, predecir su calidad tonal. Así, con este método es posible observar los armónicos que el instrumento podrá tocar de forma afinada, lo que constituye una información valiosísima en orden al cálculo de las posiciones de los orificios y, por tanto, para optimizar su acústica. Cualquier desviación de las relaciones armónicas estrictas puede corregirse relativamente introduciendo alteraciones en el tubo, bien en el taladro, bien en la forma de los orificios. Si bien, en la práctica cualquier alteración en el sistema desequilibra la balanza cromática, o si se quiere, introduce cierta inarmonicidad en la calidad tonal. El problema subyace debido a que el tubo del clarinete no puede diseñarse como un cilindro perfecto ya que los intervalos de los extremos estarían desafinados. Teniendo en cuenta, además, que las alteraciones en el tubo no afectan por igual a todos sus modos resonantes, es necesario determinar todas las posibles correcciones, lo cual requiere un estudio de mayor complejidad.

Para estudiar las pérdidas que se producen en los orificios actualmente se utiliza una herramienta muy útil conocida como técnica de velocimetría por imagen de partículas (PIV). Esta técnica permite obtener el campo de velocidades de fluidos de manera instantánea para examinar el flujo de aire alrededor de los orificios en niveles sonoros altos. En estos niveles el efecto del flujo no lineal puede generar turbulencias y remolinos que tienen como consecuencia pérdidas de energía en los orificios, lo que, en términos musicales, se traduce en un sonido inconsistente y precario.

Asimismo, otro aspecto importante en el diseño de un clarinete se centra en corregir las discrepancias en la afinación causadas por el uso de un solo orificio de registro que sube la frecuencia del segundo armónico en ambos extremos de la escala. En este sentido, el diseño de este orificio ha sido objeto de estudio y experimentación a lo largo de la historia por varios fabricantes e intérpretes, aunque todavía permanece vigente el mismo diseño del siglo XIX, entre otras razones, por los cambios de digitación que lleva asociados cualquier mejora técnica.

2. El clarinete como tubo sonoro

Como cualquier aerófono, el elemento que determina en gran medida el comportamiento acústico del clarinete es la geometría de su tubo. Por ello, conviene explorar la física de los tubos sonoros para realizar una primera aproximación a la acústica del clarinete. En este sentido, para llevar a cabo el estudio de los tubos sonoros es preceptivo considerar ciertas hipótesis que no siempre se cumplen en los instrumentos musicales. En principio, se considera la onda que viaja en el interior de un tubo cilíndrico como una onda plana, lo cual no es del todo acertado por varias razones: en primer lugar, las paredes del tubo no son nunca perfectamente rígidas, ni completamente cilíndricas; en segundo lugar, la velocidad de la onda no es constante; por último, suele haber disipación de energía en el curso de la propagación por los intercambios de calor entre el gas y las paredes, lo que produce amortiguamiento de la onda. Estas pérdidas que ocurren en las paredes del tubo son definidas como viscosas y térmicas. Las primeras, se producen debido al hecho de que el aire tiene una viscosidad finita, lo que reduce la velocidad de la partícula del aire gradualmente cuando se aproxima a las paredes. Las segundas, porque las paredes tienen prácticamente una temperatura constante, mientras que la temperatura en el gas fluctúa debido fundamentalmente a oscilaciones de presión adiabáticas. Estas pérdidas de energía explican el debilitamiento de las frecuencias altas si se observan en un espectro (fig. 2.2), ya que en estas frecuencias las pérdidas son más ostensibles.

Por otro lado, cuando hablamos de tubos sonoros debemos tener claro los conceptos de nodos y vientres. Efectivamente, las ondas sonoras longitudinales se reflejan en los extremos originando unos modelos determinados de ondas estacionarias,

que presentan zonas de máxima presión, denominadas *vientres* o *antinodos*, y zonas donde la variación de la presión atmosférica es cero, llamados *nodos*. Pues bien, normalmente estas ondas estacionarias se asocian con la resonancia en las columnas aéreas principalmente por lo que se refiere al desplazamiento de aire en las columnas, pero también pueden verificarse según las variaciones de presión en la columna. Así, una zona de máximo presión siempre es, al mismo tiempo, una zona de cero desplazamiento, y viceversa. En este sentido, hablamos de desplazamiento cuando la curva tiene un vientre en la campana, dado que en ese punto las moléculas de aire tienen libertad para moverse. Sin embargo, cerca de la boquilla el flujo acústico es mínimo y la presión máxima debido a la alta impedancia acústica en ese punto. Así que no hay que confundir los nodos y vientres de presión, que constituyen regiones de compresión y dilatación de las partículas aéreas, con los de desplazamiento, los cuales refieren el movimiento de la onda longitudinal.

En general, cuatro tipos de tubos son comúnmente utilizados para fines musicales: el cilindro abierto, el cilindro cerrado¹, el exponencial y el cono. La razón es que estos tubos tienen picos de resonancia en varias frecuencias que siguen una serie armónica, salvo el exponencial que se utiliza en la sección inferior del instrumento para ajustar la afinación de las notas más graves y favorecer su radiación. En este sentido, los diseñadores de instrumentos de viento generalmente suelen templar los armónicos porque de esta forma cuando se toca el fundamental los armónicos superiores participan en la vibración total, reforzándola y produciendo un tono fuerte, estable y rico, mientras que en ausencia de esta cooperación entre el fundamental y los armónicos, el tono suele ser inestable. Además, estos instrumentos aprovechan las resonancias más altas para proveer los registros superiores, y si las resonancias son fuertes estos tonos serán emitidos de forma estable y afinada.

El clarinete es un claro representante de los tubos cerrados, es decir, aquellos que tienen un extremo abierto y otro cerrado herméticamente. Sin embargo, en la práctica la cavidad de la boquilla en el extremo de la caña, el hueco que dejan los orificios tapados por los dedos, las zonas ampliadas en algunas regiones del tubo y la campana, introducen cambios que desvían la simetría de un cilindro. Como tal, el clarinete solo emite las resonancias que siguen los armónicos impares de una serie armónica, si bien algunos componentes pares también participan de la vibración, generados por el efecto de la lengüeta, las resonancias del tracto vocal y las zonas ampliadas del tubo. Por supuesto, estos armónicos no pueden ser usados como notas de la escala, pero tiene una especial contribución en la calidad tonal del instrumento.

Salvo en la flauta, cuyo tubo funciona como abierto debido a que su embocadura no se cierra herméticamente como en el resto de instrumentos del grupo, el extremo cerrado acústicamente se sitúa en la embocadura. Si hablamos de presión, esa región, por tanto, no puede tener un nodo de presión sino un vientre, dado que constituye el punto de excitación y ahí la presión acústica y la impedancia es alta. Piénsese que el instrumentista proporciona una presión por encima de la atmosférica necesaria para generar la perturbación. Por su parte, en el extremo abierto siempre se forma un nodo de presión, dado que en ese punto la presión acústica interna conecta con la externa, y por lo tanto se sitúa cerca de la presión atmosférica. De acuerdo a Ridgen (1977) "las paredes del tubo proporcionan cierta rigidez contra la que el aire incluido puede acumularse y desarrollar variaciones de presión considerables. En los extremos abiertos del tubo, sin embargo, no hay ninguna pared rígida contra las que el aire puede acumularse y, por lo tanto, la presión mantenida tiene el mismo valor constante que la presión externa atmosférica" (p. 88).

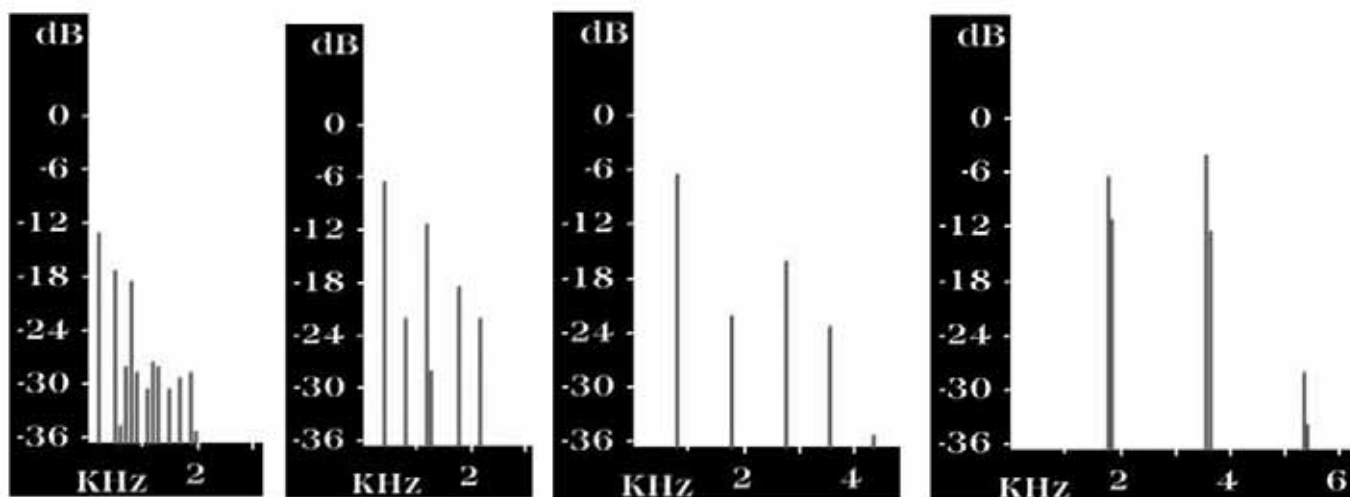


Fig. 2.1 Espectrogramas en clarinete Sib: (de izd. a dcha.): a) Mi_3 ; b) Si_3 ; c) Si_4 ; d) Si_5 .

¹ Algunos autores utilizan el término *semicerrado* para los tubos con una sola abertura, y *cerrados* para los tubos sin ninguna abertura.

El principio descrito permite explicar una de las particularidades acústicas del clarinete que tiene que ver con sus modos de resonancia o armónicos. A diferencia de la flauta que utiliza un cilindro abierto y que por tanto la onda estacionaria resultante proporciona un vientre de desplazamiento o nodo de presión en cada extremo, el tubo cerrado del clarinete presenta una onda estacionaria asimétrica con un nodo de desplazamiento en el extremo cerrado y un vientre de desplazamiento en el extremo abierto. Por tanto, su vibración fundamental no puede subdividirse en mitades pares, sino en segmentos impares con frecuencias que siguen, por consiguiente, los números impares de una serie armónica: por ejemplo, 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, etc. Sin embargo, en la práctica este especial comportamiento del clarinete suele inducir a error en el músico, dado que su sistema acústico también produce ciertos armónicos pares de baja intensidad, como se ha dicho anteriormente. Este particular funcionamiento lleva aparejados ciertos efectos colaterales que afectan directamente a su calidad tonal y que explican las discrepancias de afinación en ciertos tonos y la heterogeneidad timbrica entre sus registros.

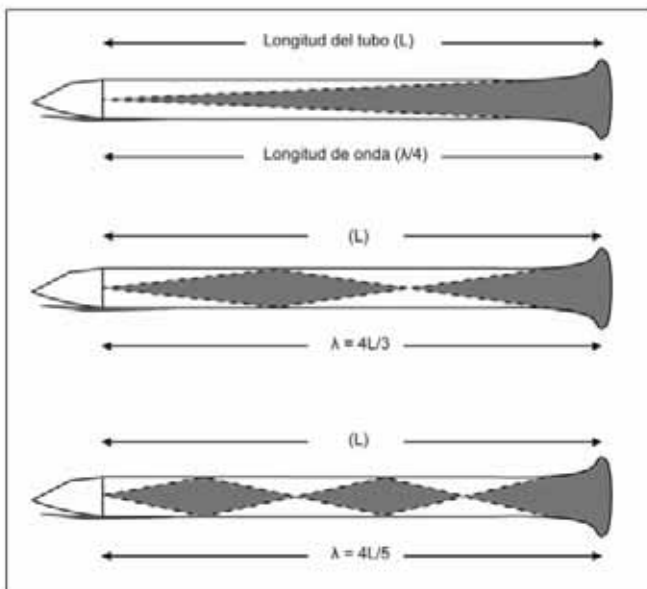


Fig. 2.2 Modos resonantes en un tubo cilíndrico cerrado

La otra particularidad acústica relacionada con el uso de un cilindro cerrado afecta a las frecuencias de sus resonancias armónicas, dado que, a diferencia del cilindro abierto o el cono² donde las ondas viajeras recorren dos longitudes de tubo para completar un ciclo en el modo fundamental, en el cilindro cerrado las ondas viajeras recorren cuatro veces el

tubo. De este modo, su longitud de onda constituye el doble en relación con la de la flauta y el oboe y, dado que ésta es inversamente proporcional a la frecuencia y que el doble constituye la octava de acuerdo con la serie armónica, los cilindros abiertos y los conos emiten su fundamental a la octava respecto de los cilindros cerrados. En otras palabras, el tubo abierto requiere el doble de longitud que el cerrado para tocar la misma fundamental.

3. Sistema de excitación

El otro elemento básico en el funcionamiento acústico del clarinete es su sistema de excitación. En sentido lato, el principio acústico en cualquier instrumento de viento consiste en la vibración de las columnas de aire contenidas en sus tubos, activadas gracias a la excitación producida en la boquilla del instrumento. La energía la proporciona el instrumentista mediante un flujo de aire con una presión por encima de la atmosférica, lo que constituye la fuente de entrada de energía o corriente continua al instrumento. La frecuencia del flujo de aire en el tubo está determinada por las frecuencias resonantes del tubo (Olson, 1967). Estableciendo una analogía con la energía eléctrica, esta energía suministrada por el instrumentista debe transformarse en una energía vibratoria o corriente alterna. En el clarinete, la caña actúa como una válvula que genera un componente oscilante que transforma el flujo en una energía vibratoria. Se puede decir que estos elementos trabajan como un oscilador de control de forma que la vibración de la caña está controlada por la presión acústica desarrollada en la boquilla en respuesta al estímulo de un flujo de aire inyectado por los pulmones del instrumentista. La diferencia de presión entre la boca del músico y la boquilla permiten generar las variaciones de la presión atmosférica en el tubo necesarias para engendrar el sonido.

En rigor, las ondas sonoras en el clarinete son generadas por la caña que vibra a una cierta frecuencia controlada principalmente por la resonancia del aire contenido en el cuerpo y secundariamente por la lengüeta. Así, un tono se produce cuando una resonancia del juego de frecuencias generada por el excitador y una frecuencia de resonancia del aire dentro del tubo se enganchan. La resonancia del tubo impone y controla en mayor medida la frecuencia de vibración de la caña, si bien los armónicos producidos por la caña deben encontrar las frecuencias de resonancia del tubo para excitarlas. En este sentido, el aire encerrado en el tubo

² Para los tubos cónicos como el del oboe, fagot y saxofón, también se tiene, al igual que en la flauta, un cero de presión en la campana y un máximo en la caña, pero para obtener las ondas, que adoptarán la forma de seno -presión- y coseno -desplazamiento-, debe considerarse un factor $1/r$ para el área cruzada que va como el cuadrado de la distancia de la caña. Para el entendimiento de esta cuestión, piénsese que cuando las ondas longitudinales dentro del tubo entran en contacto con la atmósfera exterior, se transforman en ondas esféricas de radio creciente. En estas circunstancias su intensidad decrece como $1/r^2$, debido a que se extiende a través del área de una esfera que es proporcional al r^2 . En este supuesto, la intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de la amplitud y, por tanto, la presión y velocidad son proporcionales a $1/r$. De manera que el tubo cónico en el oboe, fagot y saxofón tienen una solución esférica y se expresan en términos de armónicos de tipo esférico, mientras que el cilindro tiene una solución de onda plana y se interpreta en términos de coseno, en el clarinete, y seno, en la flauta.

tiene una masa considerable comparada con la lengüeta, de manera que es capaz de obligar a la caña, que vibra de forma más autónoma, a acomodarse a una de sus frecuencias naturales. En definitiva, la calidad del tono depende de la colaboración entre el excitador y el resonador. En este sentido, cuanto más resonancias estén presentes para cooperar y con más exactitud estén alineadas, mejor calidad tonal y más tonos y mejor afinados podrán emitirse.

En el caso del clarinete, el excitador o generador acústico lo constituye la caña simple y está caracterizado por operar sobre una amplia gama de frecuencias que se extiende desde las frecuencias bajas hasta casi la frecuencia de resonancia de la caña. Esta frecuencia se sitúa alrededor de 2.000-3.000 Hz. Las oscilaciones en estas frecuencias son prevenidas en gran parte por la presión que ejerce el labio inferior contra la caña (Rossing, 1990). Sin embargo, cuando el clarinetista coloca sus labios en la caña y oprime insuflando aire al instrumento, las resonancias de la caña se reducen considerablemente. Esto permite que las resonancias del tubo tomen el control. Simplificando, el clarinete emite normalmente más fuerte las resonancias del tubo cuyas frecuencias son inferiores a las de la caña. Sin embargo, en determinadas circunstancias, el instrumento puede emitir un rechinamiento, que no es ni más ni menos que la emisión de una frecuencia natural de la caña sin respuesta resonante del tubo. Este imponderable puede prevenirse aplicando la debida humectación.

Una vez que el clarinetista ha soplado en su boquilla, la caña, en posición inicial de 0° , se abre y permite fluir un soplo de aire en el instrumento. Al mismo tiempo, comienza su balanceo cerrándose hacia la boquilla hasta alcanzar la posición de 90° completando $\frac{1}{4}$ de ciclo. El soplo de aire -o el pulso de presión positiva- produce una compresión que viaja hacia abajo del tubo, donde la presión bruscamente desciende a la presión atmosférica. Esto provoca que una pulsación de presión negativa se propague hacia la boquilla -o lo que es lo mismo, que la onda se refleje y retorne en sentido contrario-. Cuando llega, la caña completa su oscilación hacia la boquilla, y la pulsación de presión negativa obliga a la caña a cerrarse en posición de 180° , completando medio ciclo. Ya que la lengüeta se halla ahora cerrada o casi cerrada, muy poco aire puede penetrar en la boquilla, con lo cual la pulsación de presión negativa -o la onda- se propaga de nuevo por el tubo hacia el final abierto. Ahora se invierte la cadena de acontecimientos. La pulsación de presión negativa llega al final abierto en posición de 270° - $\frac{3}{4}$ de ciclo-, la presión de repente se eleva al cero -en realidad, a la presión atmosférica normal-, y una pulsación de presión positiva comienza su viaje hacia la boquilla -la onda se refleja de nuevo-. Cuando llega, la caña se abre de súbito en posición de 360° y la pulsación de presión la empuja a la posición más lejana de la boquilla para que un soplo nuevo de aire pueda introducirse y comenzar un nuevo ciclo.

En este proceso, el periodo de vibración de la caña -el tiempo empleado para completar el ciclo descrito- debe coincidir con el tiempo que ha tardado el pulso de onda en cubrir cuatro viajes en el tubo. De esta forma, la distancia que habrá recorrido la onda en el tiempo de un periodo -lo que constituye la longitud de onda- será igual a cuatro longitudes de tubo, y por tanto la siguiente onda generada por la caña se solapará con la primera e interferirán constructivamente formando una onda estacionaria. El siguiente modo en el que la caña podrá cerrar la columna de aire es vibrando tres veces tan rápido como en el modo descrito -tercer armónico-. En este caso el periodo de vibración de la caña sería el triple de rápido. Si la presión en la embocadura es considerable, la tendencia conducirá a saltar al modo siguiente que, en el caso del clarinete, tiene una frecuencia quintuple respecto del modo fundamental, esto es, el quinto armónico.

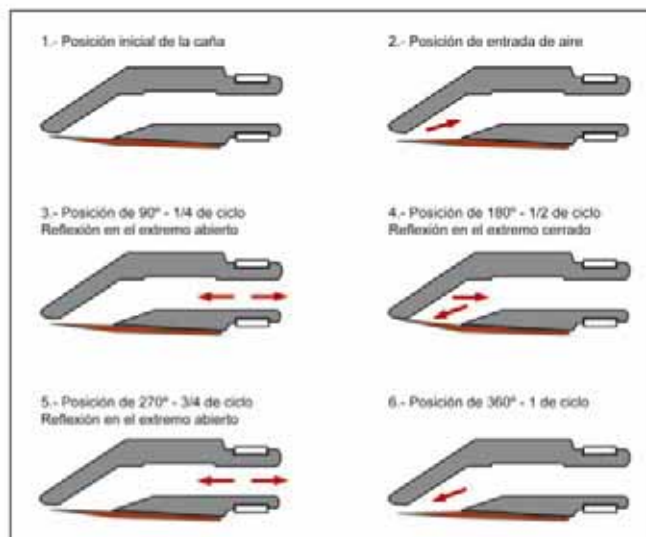


Fig. 3.1 Ciclo de vibración de una caña simple

La influencia de la elasticidad de la caña sobre las frecuencias naturales de una columna de aire ha sido estudiada por Benade (1974). En esencia, sus conclusiones han permitido constatar que la frecuencia de resonancia de una columna de aire cerrada en un extremo por una caña siempre se sitúa por debajo de la frecuencia natural de la caña. Además, "cualquier cambio en esta frecuencia natural puede modificar la frecuencia de los modos de resonancia, en particular, de los más altos... La magnitud de estos efectos puede reducirse humedeciendo la caña por el clarinetista" (p. 436).

4. Obtención de la escala

Como hemos tratado en los apartados precedentes, el sonido se produce y sostiene en el clarinete gracias a la cooperación entre dos elementos interconectados: el dispositivo generador de la onda sonora -la boquilla constituida por una lengüeta y una cavidad resonadora- y el tubo del instrumento -el

contenedor de la sustancia sonora vibrante- que actúa como un resonador amplificando las resonancias. Pero es menester, además, disponer de unos *orificios tonales* -ubicados *ad hoc* en el tubo y que se accionan mediante unos mecanismos más o menos complejos-, cuya función consiste en dividir la columna gaseosa del tubo en varios segmentos con frecuencias propias para producir una escala, y uno o varios *orificios de registro* que permitan obtener los armónicos superiores y, por tanto, ampliar esa escala a varias octavas.

Una vez que se ha producido el enganche entre una de las frecuencias naturales del tubo y la frecuencia natural de la lengüeta, el músico puede alterar la frecuencia del sistema mediante dos procedimientos básicos: alterar la longitud de la columna aérea que está operando o hacer uso de uno de los armónicos superiores obtenibles como la altura final de la nota. Analicemos ambos procedimientos detenidamente.

4.1 Orificios tonales

El primer método se lleva a cabo en el clarinete perforando las paredes del tubo con orificios de diámetro adecuado y dispuestos convenientemente de acuerdo con un estudio acústico previo, utilizando la impedancia de entrada de aire como una función de la frecuencia y la función de suma para el cálculo de las posiciones idóneas. Su activación mediante un mecanismo más o menos complejo permite alterar la longitud de la columna aérea y determinar, por consiguiente, la altura del sonido que se busca.

Los orificios constituyen los sistemas de control del diapasón más fáciles y prácticos en los instrumentos de viento-madera, especialmente para instrumentos pequeños. Para instrumentos de grandes dimensiones se plantean dificultades ergonómicas tales como obturar agujeros que son demasiado grandes para ser cubiertos por los dedos, o aproximar los orificios al alcance de la mano, por lo que se hace menester el uso de mecanismos para solucionar estos problemas.

Las frecuencias de resonancia del clarinete -o de cualquier instrumento de viento-madera- están determinadas por la geometría del tubo y por los agujeros, los cuales se abren y cierran convenientemente para emitir la escala del instrumento. Por consiguiente, la función de estos dispositivos consiste en dividir la columna gaseosa en segmentos con frecuencias propias. En este sentido, estas aberturas funcionan como extremos abiertos al igual que lo hace la campana del instrumento, posibilitando de esta suerte las diferentes fundamentales en el registro grave, o bien los armónicos de orden impar en el registro agudo y sobreagudo. Comenzando con todos los agujeros cerrados, se utiliza la longitud completa del tubo y la columna de aire vibra con su frecuencia fundamental -con un vientre de presión en el extremo cerrado y un nodo en el abierto-. Cuando el agujero más bajo se abre, el tubo se acorta y la columna de aire vibra con una frecuencia más alta. Por tanto, mediante la apertura sucesiva desde el agujero más inferior, la frecuencia se va in-

crementando y el diapasón sube. Cuando todos los agujeros están abiertos, la escala está completa, pero repitiendo la operación y utilizando un *orificio de registro*, el primer armónico del tubo se inhibe y permite al segundo armónico -tercero en el clarinete- tomar el control del diapasón. En estas condiciones, el clarinetista puede obtener de nuevo una serie de sonidos con la sucesiva apertura de los orificios, aunque en este caso sea utilizando el tercer armónico. La operación se repite de nuevo con el quinto, séptimo, noveno y undécimo armónico. Sin embargo, en estos armónicos es necesario utilizar otros orificios tonales que funcionan virtualmente como orificios de registro.

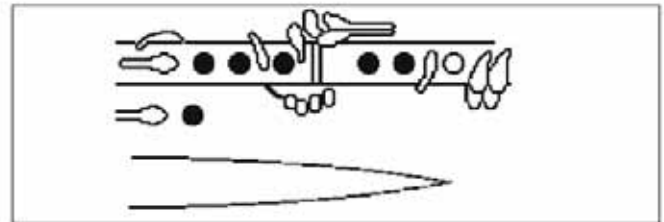


Fig. 4.1 Longitud de onda para La_3

Ahora bien, como los orificios deben funcionar para obtener las diferentes longitudes acústicas de cada uno de las resonancias armónicas del instrumento y el diámetro es finito, el efecto en la frecuencia es diferente para cada armónico. Para las frecuencias bajas el orificio funciona correctamente y delimita la longitud acústica en ese punto, pero para las más altas el sonido se transfiere a lo largo del tubo bajando la frecuencia. En este sentido, la longitud acortada por el orificio será eficaz si el diámetro del orificio es comparable al del tubo. Efectivamente, si el diámetro del orificio es bastante grande funciona como un extremo abierto y define la posición exacta de un nodo de presión. Pero si es muy pequeño tiene un efecto mínimo sobre las frecuencias resonantes, aunque son usados en la práctica como orificios de registro para asistir en la iniciación de los modos más altos de vibración.

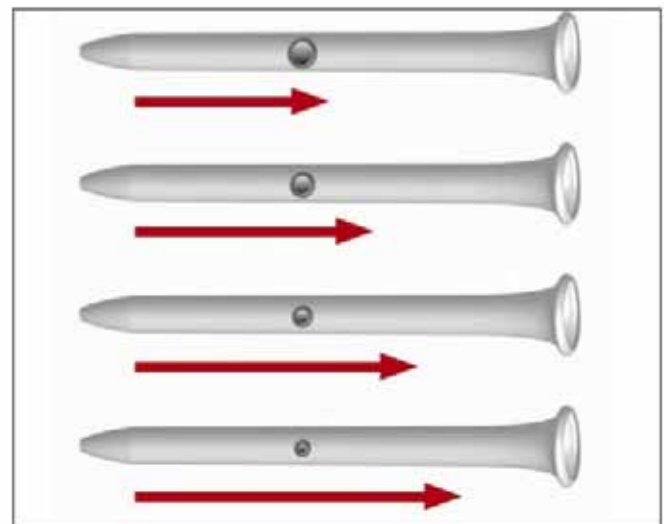


Fig. 4.2 Longitud de onda efectiva para diferentes diámetros de orificio

Por razones prácticas de diseño estos orificios tienen un diámetro pequeño y, por ende, no son equivalentes con un extremo abierto, por lo que la longitud eficaz del tubo es algo más larga que la distancia real entre el extremo superior del tubo y el agujero abierto, lo que se conoce como *corrección del extremo abierto del tubo*.

El número y forma de los agujeros que se requieren para constituir una escala temperada depende de la naturaleza del tubo. En una aproximación simple, las frecuencias resonantes de un cilindro cerrado deben corresponder a los números impares de una serie armónica -por ejemplo, 100 Hz, 300 Hz, 500 Hz...-, mientras que en un cilindro abierto y en un cono seguirán los números pares e impares -100 Hz, 200 Hz, 300 Hz...-. Esto significa que los instrumentos con tubo cónico o cilíndrico abierto tienen los primeros y segundos modos separados por una octava -esto es, la distancia entre el primer y segundo armónico según la serie armónica- que contiene 12 semitonos, mientras que los cilíndricos que funcionan como cerrados tienen el primer y segundo modo separados por una doceava, esto es, 20 semitonos -lo que equivale al intervalo de octava más quinta formado entre el primer y tercer armónico de la serie-. Por consiguiente, para emitir una escala cromática se requieren, como mínimo, 11 orificios en el primer caso y 19 en el segundo, lo que dificulta sobremanera el diseño en este último caso.

Para el diseño de estos mecanismos es menester realizar un estudio detallado de las propiedades acústicas del instrumento, con especial atención a las pérdidas de energía por la fricción con las paredes del tubo, la viscosidad del medio, la radiación al exterior y las irregularidades del taladro. Además, es necesario considerar varios parámetros: el espaciado entre un orificio y otro, el diámetro, la profundidad, los oídos y la altura de la zapatilla con respecto al orificio que obtura. La determinación de la frecuencia por un orificio depende de estos parámetros. Ya que la proporción de transferencia de las vibraciones de un medio a otro depende de la magnitud relativa de las impedancias de dos medios, modificando estos parámetros se altera la impedancia y, por tanto, es posible modificar no solo la proporción de energía reflejada y radiada, sino también la longitud de onda.

El saxofón utiliza orificios con un diámetro que se incrementa proporcionalmente a medida que se desciende por la escala, gracias a su tubo cónico. Para el diseño de la flauta, sin embargo, se emplean orificios de diámetro constante, dado que su sección cruzada es constante. En el caso del clarinete, es preciso introducir todos los parámetros de diseño dado que no es un cilindro ideal. Las alteraciones en la geometría de su tubo y boquilla, la abertura exponencial de la campana, así como los orificios cerrados, modifican el volumen de aire incluido y, por tanto, afectan directamente a la acústica de la columna de aire del tubo.

Considerando los dos primeros parámetros, para establecer la afinación sistémica del instrumento es preciso que los

agujeros no estén igualmente espaciados a lo largo de la longitud del tubo, ni que el diámetro sea el mismo para todos los orificios. El espaciado entre los agujeros aumenta proporcionalmente con la distancia de la boquilla. Así, si se emite un sonido con una longitud L de tubo y se cierra un nuevo agujero para bajar el diapason un semitono, este agujero debe añadir aproximadamente un incremento de longitud de $0.06 L$ o de un 6% de tubo (Ridgen, 1977), lo que corresponde al valor del semitono temperado. Esto explica, en algunos aerófonos, por qué el espaciado entre los agujeros que están más lejos de la boquilla es mayor que el de los que se ubican más próximos, dado que el incremento del 6% de la longitud operativa del tubo es cada vez mayor a medida que se baja el diapason.

En el caso del clarinete, para satisfacer esta condición se recurre, además, al diseño del diámetro del orificio y su profundidad, debido, como ya se ha dicho, a las desviaciones introducidas por los defectos de circularidad de su tubo y los orificios cerrados. De esta forma, si se amplía el espaciado, es necesario incrementar el diámetro gradualmente a medida que bajamos por la escala, o la profundidad del orificio. El uso de los oídos o chimeneas en los orificios contribuye a este propósito, al margen de resultar necesarios a efectos prácticos cuando se utilizan anillos sobre los orificios.

Aunque el diseño de estos agujeros se ha llevado a cabo tradicionalmente de forma empírica, en la actualidad las herramientas que aporta la ciencia permite realizarlo mediante la impedancia de entrada en el tubo y el modelo acústico lineal basado en establecer ciertas hipótesis para obtener las ecuaciones de las ondas. Este modelo presupone algunas hipótesis de partida, a saber: que el incremento de presión, densidad y velocidad de las partículas es pequeño frente a su valor de equilibrio; que el fluido en el que se propaga la onda es ideal; por último, que el proceso se considera adiabático.

4.2 Orificio de registro

El segundo método, más impreciso en lo que a afinación se refiere por las particularidades de las series armónicas y las vibraciones de las columnas de aire, consiste en inhibir el sonido fundamental obligando así a que suene el armónico deseado y se perciba como la altura final. Para llevarlo a cabo se utiliza un orificio, denominado *de registro*, que activándolo genera un nodo de presión en la columna, dividiéndola en partes alicuotas.

Para utilizar la segunda resonancia del tubo y cambiar a un registro alto es necesario reducir la fuerza de la resonancia fundamental o modificar su frecuencia de forma que no pueda cooperar con otros modos, esto es, inhibirlo. El método más efectivo para reducir la fuerza de una resonancia consiste en liberar una cantidad mínima de aire en un punto donde el modo fundamental tenga una presión máxima. La

función de este orificio, por tanto, consiste en perturbar la intensidad y frecuencia del modo fundamental para una nota dada, en un punto donde no pueda cooperar con otras resonancias. De esta forma, este armónico no puede participar del régimen de oscilación y quedando así fuera de juego.



Fig. 4.3 Llave portavoz (nº 12) en el sistema Boehm

Así, cuando este agujero está cerrado, la columna de aire vibra normalmente, predominando el modo inferior. Pero cuando se abre, se ventila una cantidad mínima de aire en un punto donde ese modo tiene una presión máxima necesaria para mantener su régimen de oscilación. De este modo se previene la acumulación de fluctuaciones de presión, lo que favorece la formación de un nodo de presión y se induce al modo superior a tomar el control del diapasón para que se perciba como el tono predominante (Nederveen, 1969).

En el clarinete, el diseño de un único orificio de registro ha planteado algún que otro problema. Nótese que para que funcione óptimamente este orificio debe situarse en una zona de máxima presión para el modo fundamental, esto es, en un vientre de presión. Aunque todas las fundamentales presentan un vientre de presión en el extremo superior del tubo, condición indispensable para que el orificio de registro funcione óptimamente, la longitud de la onda estacionaria es diferente para cada nota. El resultado es que la longitud de onda de las notas de los extremos del tubo es acortada ligeramente cuando se acciona este orificio, de forma que su frecuencia se sube ligeramente por encima de su valor nominal.

El problema subyace debido a que este orificio se diseña para que funcione como orificio tonal y como orificio de registro para dar el *Sib*₃ del registro medio³. La capacidad para que un orificio funcione como orificio de registro depende de su diámetro. En este sentido, cuanto más pequeño sea el diámetro del orificio más facilidad para funcionar como orificio de registro, y cuanto más grande sea la apertura, mayor disposición para actuar exclusivamente como un extremo eficaz de una longitud de tubo. Por esta razón, debe encontrarse un compromiso para diseñar su diámetro, dado que si se amplía se mejora el *Sib*₃, pero se desafinan las doceavas de los extremos del tubo, además de comprometer

su funcionamiento como orificio de registro. En definitiva, estos tonos anómalos son solucionados a medias practicando alteraciones en la forma interior del tubo. Obviamente este problema podría solucionarse separando ambas funciones —como orificio tonal y como orificio de registro— en dos llaves independientes. Esta solución ha sido aplicada en algunos modelos, aunque no ha llegado a consolidarse por los cambios de digitación que lleva asociados y que el músico no suele ver con buenos ojos⁴.

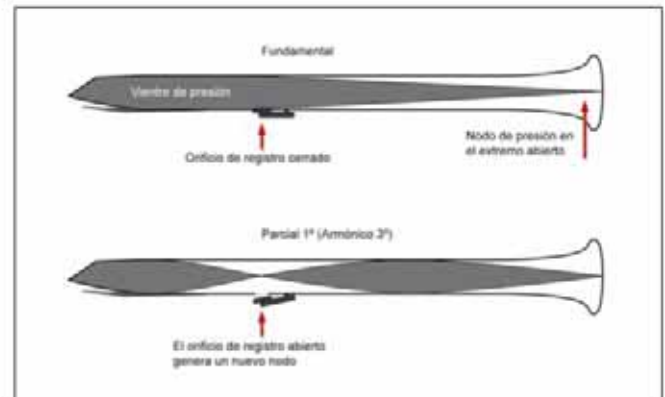


Fig. 4.4 Funcionamiento virtual del orificio de registro en el clarinete

5. Factores en la calidad tonal

La calidad tonal en cualquier instrumento de viento está determinada por las cooperaciones entre las frecuencias resonantes del tubo. De acuerdo a Benade (1990), para que se mantengan un óptimo régimen de oscilación en el tubo que permita la emisión de un tono afinado y consistente, las frecuencias de las resonancias del tubo deben hallarse relacionadas armónicamente para engancharse con las frecuencias de la lengüeta. Cuantas más frecuencias resonantes y mejor relacionadas armónicamente se hallen, mejor calidad tonal. Por ello, los instrumentos de viento se diseñan de forma que sus tonos se ajusten a la serie armónica, ya que de esta forma podrán colaborar con la vibración. En este sentido, si algún armónico incluido en el complejo sonoro se desvía de la serie armónica, puede contaminar el régimen de oscilación e introducir una ligera inarmonicidad en el sistema.

En el clarinete, es necesario introducir ciertas correcciones en el tubo para ajustar las relaciones modales y optimizar la calidad tonal. En este instrumento, las anomalías en ciertos tonos son más ostensibles debido, por un lado, al uso de un solo orificio de registro en un cilindro que sube en exceso la frecuencia de estos sonidos en el segundo y tercer registro, y por otro, a su funcionamiento de tubo cerrado

³ Según el índice acústico-musical franco-belga.

⁴ Los sistemas *McIntyre*, la *Reforma Boehm*, *Mazzeo* y *Stubbins*, son algunos ejemplos que han separado la función dual del orificio de registro en dos llaves independientes.

que le impele al octavo a la doceava. En cuanto a la geometría del tubo, ésta responde a razones exclusivas de ajuste de las resonancias armónicas. Si el clarinete fuera un cilindro perfecto los intervalos serían demasiado anchos y, por tanto, los diferentes registros estarían desafinados. Este efecto se corrige por variaciones o perturbaciones en la forma cilíndrica del taladro -incluso en la forma de la boquilla- y por retoques en los orificios. En el caso de la abertura de la campana, su diseño debe mitigar las anchas doceavas de Mi_2 y Fa_2 , aunque con esto se sacrifique la calidad tonal de esas notas. Sin embargo, estas correcciones no están exentas de ciertos efectos colaterales que perjudican otros aspectos del funcionamiento del instrumento, tanto en lo que se refiere a la afinación, como al timbre.

Para estudiar el comportamiento de la columna de aire en el clarinete o en cualquier instrumento de viento, pueden obtenerse las señales en el dominio de la frecuencia o del tiempo. Los resultados pueden ser transformados de un dominio al otro usando el método rápido de transformación de Fourier, lo que proporciona la respuesta de impulso de la columna de aire del instrumento. Pero para abordar el estudio del funcionamiento del instrumento y optimizar su calidad tonal es necesario obtener las curvas de impedancia midiéndola en la boquilla. La información obtenida permite, por tanto, cuantificar la respuesta del tubo a las distintas frecuencias de excitación, en forma de picos (fig. 5.1). De esta forma, si la frecuencia de un pico de impedancia determinado coincide con un múltiplo entero del fundamental, entonces ese armónico será fuertemente reforzado dentro del tubo (Campbell & Greated, 1987).

Los resultados obtenidos mediante las curvas de impedancia de cada nota son cotejados con sus frecuencias nominales y las posibles desviaciones son corregidas mediante alteraciones en la forma del tubo o de los orificios. Estas correcciones se validan experimentalmente con el músico tocando varias veces su instrumento para reducir el margen de error. Se trata, por tanto, de aplicar en el diseño del tubo y en su mecanismo las correcciones pertinentes para que las relaciones de número entero entre las frecuencias resonantes dentro del tubo se aproximen lo máximo a la serie armónica, dado que de esta forma las colaboraciones para la instauración del régimen de oscilación serán más productivas. En esencia, este método debe proporcionar las medidas correctas para dividir el tubo del instrumento en varias longitudes mediante el taladro de los orificios.

5.1 Corrección del extremo abierto del tubo y frecuencia de corte

Un aspecto básico en la calidad tonal del clarinete lo constituye el diseño de los orificios tonales que tienen que dar las frecuencias temperadas. En el apartado 4.1 apuntamos que la longitud acertada por el orificio es eficaz si el diámetro del orificio es comparable al del tubo. Wolfe (1997-2010) ha estudiado el comportamiento acústico de

los orificios tonales. En esencia, sostienen que la reflexión de la onda en un orificio abierto depende de la capacidad de ésta para mover la masa aérea albergada en el orificio abierto. La aceleración que se requiere para ello se incrementa con el cuadrado de la frecuencia. En las ondas de frecuencia grave los ciclos son más largos y las partículas se mueven más despacio, de manera que la onda dispone de suficiente tiempo en un ciclo para moverlo y reflejarse, dando lugar a ondas estacionarias de amplitud significativa. Pero para una onda de frecuencia alta el tiempo de un ciclo no es suficiente para acelerarlo. Como consecuencia, el aire del orificio impide el paso de estas ondas, transmitiéndose a lo largo del tubo y filtrándose por los siguientes orificios al exterior del tubo. Estas pérdidas de energía debilitan las resonancias agudas, pues cuanto más sonido se irradia menos queda reflejado. A cambio, el sonido radiado suma energía extra de frecuencias altas que contribuye a caracterizar el color del instrumento. Por consiguiente, para las frecuencias bajas el orificio funciona correctamente, pero para las más altas el sonido se transfiere a lo largo del tubo bajando así la frecuencia.

Este fenómeno explica que en cualquier instrumento de viento-madera -y especialmente en el clarinete por su condición de tubo cerrado- la afinación de los sonidos de los segundos y superiores registros tiende a ser ligeramente más baja dado que su longitud de onda se incrementa con la corrección del extremo, a no ser que esto sea neutralizado por cambios en la forma del tubo, en el segundo modo, o mediante llaves adicionales en el mecanismo, en el tercer y sucesivos modos. Se entiende con este argumento, por un lado, la razón por la cual los sonidos de los modos más altos no utilizan las mismas digitaciones de sus fundamentales de origen, sino que deben ser perfeccionadas para ajustar la frecuencia que se busca, y por otro, el debilitamiento de las resonancias más agudas al que me refería unas líneas antes.

El punto donde la mayor parte de la energía sonora se filtra en el primer orificio abierto en lugar de reflejarse se conoce como *frecuencia de corte* y depende del diámetro, la forma y el espaciado entre los orificios. En un clarinete, la frecuencia de corte se estima entre 1600 y 1800 Hz, según el modelo. Esta frecuencia determina, asimismo, el color del instrumento. Cuando el músico toca una nota, los armónicos por debajo de la frecuencia de corte refuerzan el timbre y lo abrillantan. Más alta la frecuencia de corte, más resonancias en el régimen de colaboración debido a una menor cantidad de pérdida de energía de alta frecuencia en los orificios y, por tanto, más brillante el timbre, y viceversa. El método para modificar la frecuencia de corte consiste en alterar el diámetro, la forma y el espaciado de los orificios. Así, ampliando el diámetro del agujero, reduciendo su espaciado con el agujero siguiente, levantando la almohadilla o reduciendo la profundidad del agujero, se sube la frecuencia de corte de una nota dada y los tonos, por tanto, se abrillantan. Procediendo de forma inversa, se baja esta frecuencia y se oscurece el timbre.

Estos principios explican las diferencias en el color sonoro entre instrumentos con diferentes mecanismos o taladros y permiten relacionar el valor de la frecuencia de corte con los adjetivos de color del tono usados por los músicos para describir el timbre de un instrumento: oscuro, brillante, mate, etc.

En la figura 5.1 se muestra la curva de impedancia para la nota Do_3 . Destacan los cuatro primeros picos que corresponden a la fundamental Do_3 y sus tres parciales superiores Sol_4 , Mi_5 y $La\#_5$. Estos armónicos podrán emitirse de forma afinada dado que no superan la frecuencia de corte. Sin embargo, a partir de este límite, los picos se debilitan como consecuencia de la radiación más eficiente para los armónicos más agudos, lo que quiere decir que estas resonancias no podrán emitirse de forma óptima al carecer de la energía suficiente.

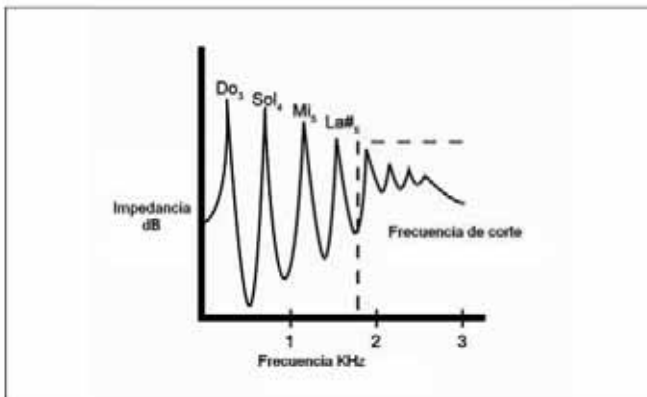


Fig. 5.1 Curva de impedancia para el Do_3

5.2 Correcciones en el tubo

Como ya se ha dicho, la calidad tonal en el clarinete se ve afectada por el efecto colateral del orificio de registro, por su especial funcionamiento acústico de tubo cerrado y por el efecto del fenómeno de la corrección del extremo abierto. Estos factores desvían las relaciones armónicas estrictas entre determinados tonos y, por tanto, es necesario corregirlas mediante alteraciones en la forma del tubo y en los orificios. El ajuste de las frecuencias en un instrumento de viento-madera depende en gran medida de las alteraciones que puedan efectuarse en su tubo, dado que de esta forma se modificará la cantidad de masa móvil en el sistema y, por tanto, la vibración de la columna de aire. Se sabe, en este sentido, que un aumento local de masa en un sistema vibrante siempre baja sus frecuencias, mientras que una reducción las sube. Sin embargo, el efecto puede divergir en función de si esta alteración se sitúa en un vientre o en un nodo de presión.

Los efectos de las alteraciones en un cilindro son enunciados por el célebre físico Lord Rayleigh -y revisadas posteriormente por Benade (1990)- en varios principios fundamentales. De forma resumida estos principios dicen que una contracción en un vientre de presión producirá un aumento local del coeficiente de elasticidad del aire dentro del tubo que levantará las frecuencias del sistema⁵, mientras que si se practica cerca de un nodo de presión causará una bajada de la frecuencia para el modo en cuestión. Por su parte, una ampliación del tubo cerca de un vientre de presión reducirá la elasticidad y bajará la frecuencia, mientras que si se sitúa cerca de un nodo de presión, sube la frecuencia. Estos cambios surten un mejor efecto en los modos graves y siempre y cuando la perturbación se extienda sobre un segmento muy corto de la columna de aire localizado en el centro de un vientre ascendente o descendente.

El efecto de la alteración, por tanto, es diferente para cada uno de los modos resonantes debido a que las zonas de presión se constituyen en puntos diferentes para cada armónico. En el caso de la parte baja del tubo, la abertura exponencial de la campana permite ajustar las relación de frecuencia 3:1 entre el primer y tercer armónico, especialmente entre el Mi_2-Si_3 y Fa_2-Do_4 . Esta alteración produce una perturbación en la columna de aire en el extremo inferior del tubo que sube ligeramente la frecuencia de los sonidos fundamentales -ya que en ese punto se sitúa un nodo de presión-, tiene un efecto menor en el segundo modo -o tercer armónico- y un efecto casi despreciable sobre el tercer modo -quinto armónico-, de acuerdo a los principios enunciados anteriormente. Teniendo en cuenta que un cilindro perfecto sube la frecuencia de los tonos del segundo registro obtenidos con toda la longitud del tubo, la relación de frecuencia entre los primeros y terceros armónicos se sitúa por encima de la relación perfecta. Sin embargo, con la ampliación en esta zona es posible corregir la discrepancia en esa relación de frecuencia -en torno a 25-30 cents-, ya que, aunque el efecto de la alteración es mayor en el primer modo que en el tercero, esta divergencia queda compensada teniendo en cuenta que la frecuencia del segundo modo se sitúa ligeramente por encima de su valor nominal en un cilindro perfecto.

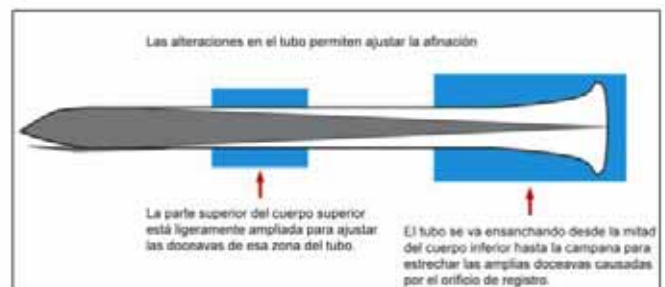


Fig. 5.2 Efecto de las perturbaciones en el tubo del clarinete sistema Boehm

⁵ Este fenómeno es análogo al caso de una masa que vibra sobre un muelle. Si la rigidez del muelle se aumenta, entonces la frecuencia de oscilación también se eleva.

En el caso de la parte alta del tubo, en la región próxima al barrilete, tanto el primer armónico –en los sonidos de la parte alta del tubo– como el tercero utilizan un nodo de presión en esa zona –cerca del orificio de registro–. Esto significa que cualquier ampliación en ese punto subirá ligeramente la frecuencia de estos armónicos, aunque en mayor proporción en el primero. Por consiguiente, el principio antes discutido a propósito de la ampliación en la parte más inferior del tubo, también puede aplicarse a este caso.

El otro método para ajustar las relaciones de frecuencia entre los diferentes modos consiste en rebajar el diámetro del orificio tonal en el punto de unión con el taladro del instrumento, lo que se conoce como *fraising*. Este procedimiento reduce la turbulencia del aire en la cavidad del orificio y contribuye a mejorar la afinación. De esta forma, es posible aumentar la sonoridad, mejorar el timbre, realizar ajustes de afinación o cambiar el intervalo entre los diferentes registros. No obstante, este método no está exento de ciertos efectos colaterales que pueden desequilibrar la balanza cromática. Efectivamente, ampliando un orificio la frecuencia del modo fundamental se sube ligeramente dado que la onda se refleja antes en un orificio más grande que en uno pequeño. Sin embargo, el efecto no es el mismo en todos los modos resonantes. Los armónicos más altos pierden energía, lo que baja la frecuencia de corte del instrumento.

Los efectos del *fraising* no se detectan con mediciones acústicas realizadas en bajos niveles sonoros, antes bien, solo son visibles cuando un instrumento se toca en un nivel sonoro alto. En estos niveles se observan turbulencias, especialmente en frecuencias altas. En la actualidad, se investigan estas pérdidas de energía en los orificios utilizando la técnica de velocimetría por imagen de partículas (PIV). Este procedimiento utiliza la óptica y el rayo láser para medir el campo de velocidades del flujo. De esta forma, es posible detectar la formación de vórtices y turbulencias en niveles sonoros medio-altos, lo que produce pérdidas sonoras que afectan a la calidad del tono. Algunos estudios han constatado que un acabado elíptico en la unión del tubo con el orificio rebajado contribuye a prevenir estas pérdidas y a mejorar la estabilidad tonal.

6. Conclusiones

Aunque el tubo del clarinete está considerado un cilindro cerrado en términos puramente acústicos, la cavidad de la boquilla en el extremo de la caña, el hueco que dejan los orificios tapados por los dedos, las zonas ampliadas en algunas regiones del tubo y la campana, introducen cambios que desvían la simetría de un cilindro. Como tal, el clarinete solo emite las resonancias que siguen los armónicos impares de una serie armónica, si bien algunos componentes pares también participan de la vibración, generados por el efecto

de la lengüeta, las resonancias del tracto vocal y las zonas ampliadas del tubo. Por supuesto, estos armónicos no pueden ser utilizados como notas de la escala, pero tiene una especial contribución en la calidad del tono. Este particular funcionamiento le reporta ciertas ventajas en relación con sus homólogos de la orquesta, tales como un amplio rango tonal o unas mayores posibilidades sonoras. En su contra, sin embargo, presenta ciertas anomalías en algunos tonos y marcadas diferencias tímbricas entre sus registros que, lejos de resultar una minusvalía acústica, constituyen su particular excelencia.

El clarinete constituye un sistema acústico cuyas partes integrantes funcionan cooperativamente para generar el sonido del instrumento. La boquilla origina la perturbación necesaria para que se engendre el sonido; el cuerpo propaga esa perturbación y su geometría determina la frecuencia de las resonancias que serán utilizadas para constituir la escala. En él se instala todo el mecanismo y los orificios para obtener los diferentes sonidos; la forma del barrilete y de la campana se diseña para ajustar ciertas resonancias armónicas, que en un cilindro perfecto estarían desafinadas. Además, otras variaciones o perturbaciones en la forma cilíndrica del taladro o retoques en los orificios son necesarios para reconducir las resonancias naturales a la serie armónica.

La calidad tonal del clarinete está sometida a diversos factores que derivan de su condición de octaveador a la doceava –debido a la utilización de un tubo cilíndrico cerrado–, del uso de un solo orificio de registro y de su principio acústico de vibración de las columnas aéreas. El orificio de registro debe proporcionar las doceavas y funcionar también como orificio tonal para el Sib_1 . Por esta razón, debe encontrarse un compromiso para diseñar su diámetro, dado que si se amplía se mejora el Sib_1 pero se desafinan las doceavas de los extremos del tubo, además de comprometer su funcionamiento como orificio de registro. La solución de este problema ha sido abordada en varios modelos separando ambas funciones con dos llaves independientes.

Las desviaciones del modelo ideal pueden ser corregidas relativamente en forma de ampliaciones en el tubo y retoques en el diámetro, el espaciado y la profundidad de los orificios –en forma de retoques en el diámetro y su profundidad–. Ahora bien, cualquier retoque tiene un efecto diferente en cada uno de los modos resonantes, por lo que debe buscarse un compromiso que satisfaga las necesidades del músico. En este sentido, la capacidad del músico para modificar la afinación y el timbre con las resonancias de su tracto vocal y las digitaciones auxiliares deviene, por tanto, en un factor esencial para obtener una óptima calidad tonal. El instrumento se suministra de fábrica lo más perfeccionado posible, pero es el músico quien debe extraer sus mejores prestaciones. En definitiva, el músico convierte la física del sonido en arte, qué paradoja!

7. Referencias y bibliografía complementaria

- [1] Backus, J. (1963). "Small vibration theory of the clarinet". *JASA*⁶, 35, 305-313.
- [2] Benade, A.H. (1959). "On woodwind instrument bores". *JASA*, 31, 137-146.
- [3] Benade, A.H. (1973). "Characterization of Woodwind by Tone-Hole Cutoff frequency". *JASA*, 54, 310.
- [4] Backus, J. (1974). "Input impedance curves of the reed woodwind instruments. *JASA*", 56, 470-480.
- [5] Benade, A.H. (1990). *Fundamentals of Musical Acoustics*. New York: Dover publications, inc.
- [6] Benade, A.H. & Keefe, D. (1996). "The Physics of a New Clarinet Design". *GSJ*⁷, 49, 113-142.
- [7] Campbell, M. & Greated, C. (1987). *The Musician's Guide to Acoustics*. New York: Oxford University Press.
- [8] Fletcher N.H. y Rossing T.D. (1998). *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer-Verlag.
- [9] Fox, S. (2000). "Basic clarinet acoustics". *Journal of the Queensland Clarinet and Saxophone Society*, 1.
- [10] Gibson, L. (1998). *Clarinet Acoustics*. Bloomington: Indiana University Press.
- [11] Hopkin, B. (1996). *Musical Instrument design*. Tucson: See Sharp Press.
- [12] Jeans, J. (1968). *Science & Music*. New York: Dover.
- [13] Nederveen, C.J. (1969). *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Amsterdam: Frits Knuf.
- [14] Olson, H.F. (1967). *Music, Physics and Engineering*. New York: Dover Publications.
- [15] Pastor, V. (2005). "Estudio y Análisis sobre la acústica y organología del clarinete y su optimización". Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] Pastor, V. (2007). "Los instrumentos de viento-madera y su acústica". *Revista Música y Educación*, 69, 91-115.
- [17] Pastor, V. (2009). "Introducción a la acústica de los instrumentos de viento-metal". *Revista de la Sociedad Acústica Española*, 40, 21-33.
- [18] Pastor, V. (2010). *El Clarinete: Acústica, Historia y Práctica*. Valencia: Rivera Editores.
- [19] Rayleigh, J.W.S. (1894). *The Theory of Sound*. New York: Segunda edición, Dover.
- [20] Ridgen, J.S. (1977). *Physics and the sound of musics*. Canadá: John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Rossing, T. D. (1990). *The Science of sound*. Canadá: Addison-Wesley Publishing Company.
- [22] Wolfe, J. (1997-2010): *Clarinet acoustics*. <http://www.phys.unsw.edu.au/clarinetacoustics>

⁶ Journal of the Acoustical Society of America.

⁷ Galpin Society Journal.

CESVA

GIP, global insulation package

www.cesva.com



MI005

Máquina de impactos

FP 121

Fuente de presión

 **Bluetooth**



SC 310

Sonómetro analizador de espectro

SOFTWARE

Cálculo de Aislamientos
CESVA Insulation Studio (CIS)

Ayuda a la medición
CESVA Measurement Assistant (CMA)

