

La acústica de los instrumentos musicales de viento - metal

Thomas R. Moore

Departamento de Física

Rollins College Winter Park, Florida, Estados Unidos

tmoore@rollins.edu

ABSTRACT

The movement of the lips, the variety of materials, the valves, the number of holes and many other factors influence the acoustics of the wind instruments. Their sound depends as much on the instrument itself as on the performance of the player. Although brasswind instruments are not classified as scientific devices, there are effects that prove that physics is everywhere, even in the most unexpected places like a trumpet.

KEYWORDS

Brasswind, instrument, trumpet, vibrations, sound.

RESUMEN

El movimiento de los labios, la variedad de materiales, las válvulas o pistones, el número de agujeros y muchos otros factores, influyen en la acústica de los instrumentos de viento - metal. Su sonido depende tanto del instrumento en sí como del músico que lo toca. Aunque los instrumentos de viento - metal no se clasifican como aparatos científicos, hay efectos que son prueba de que la física está en todas partes, incluso en los lugares más inesperados como una trompeta.

PALABRAS CLAVE

Viento - metal, instrumento, trompeta, vibraciones, sonido.

INTRODUCCIÓN

La historia de los instrumentos musicales de latón es tan larga y variada como la civilización misma. Aunque su registro precede a la fabricación del latón por varios milenios, no es el material del que está hecho el instrumento el que lo clasifica como un miembro de esa familia (en español se conocen como instrumentos de viento - metal sin señalar que se trata de latón). Más bien, es el hecho de que el sonido se origina de las vibraciones de los labios del músico. Este sonido de los labios, conocido coloquialmente por algunos como una trompetilla (*raspberry* o *Bronx cheer*), es la oscilación que ocurre para todos los miembros de la familia de viento - metal. Durante la ejecución, los labios se abren y cierran periódicamente y liberan un tren de impulsos de aire en el instrumento similar a la acción del junco o caña en un instrumento de viento - madera, y de hecho, los labios oscilantes son conocidos generalmente como una caña labial por los acústicos.

Técnicamente, estos instrumentos se llaman *labrosones* y no está claro cuando comenzaron a ser referidos como instrumentos de latón o, más correctamente, instrumentos de viento - metal (*brasswind*, en español de viento - metal, sin mencionar que es latón). Para hacer las cosas más confusas, no todos los instrumentos hechos de latón son instrumentos viento - metal. Los instrumentos en la familia del latón han sido hechos de madera, concha, cuerno de animal, cerámica, corteza de árbol, varios metales, plástico, e incluso huesos humanos. Pero el saxofón, que está hecho enteramente de latón, no es un instrumento viento - metal.

Teniendo en cuenta la diversidad cultural y geográfica de las personas que tocan instrumentos de viento - metal, la larga lista de materiales de construcción no es inesperada. De hecho, los huesos humanos serían el único material sorprendente. Es bien sabido que los huesos de animales se usaban en la antigüedad para hacer instrumentos tipo flauta,^{1, 2} y todavía se utilizan como instrumentos de percusión en algunas culturas. Pero el uso de un hueso humano para un instrumento musical es inusual. En la mayoría de las culturas, éste no es un material aceptable para fabricar instrumentos musicales; sin embargo, hay casos documentados de trompetas hechas de huesos humanos en algunas culturas amazónicas y del Himalaya.³ En una nota interesante, Baines³ relata que después de que el cuerpo de uno de los primeros europeos sepultados cerca de Darjeeling fuera enterrado, era desenterrado rápidamente por miembros de una secta local para que pudieran usar sus “huesos de trompeta”. Evidentemente, el fémur hace una trompeta útil y la víctima desafortunada era un hombre muy alto.

Además de la amplia variedad de materiales y formas, los instrumentos de viento - metal pueden tener válvulas (también conocidas como pistones), correderas, o agujeros que se pueden utilizar para tocar diferentes tonos, aunque pueden no tenerlos. El gran catálogo de instrumentos de viento -metal antiguo y moderno hace que sea difícil abordar la acústica de la familia con mucho detalle. Sin embargo, limitando inicialmente la discusión a los miembros más conocidos de la familia del viento - metal, es posible entender mucho de la física subyacente de esos instrumentos. Por lo tanto, con el fin de investigar su acústica es útil comenzar por considerar un solo instrumento y luego discutir algunas de las diferencias importantes entre éste y sus similares. Con este fin, considere la trompeta moderna.

LAS PARTES DE UNA TROMPETA MODERNA

Una fotografía de una trompeta señalando algunas de sus partes se muestra en la figura 1. (Las líneas negras en la trompeta son producto de la iluminación y no parte del instrumento, que es altamente reflectante y difícil de fotografiar). Aunque hay varias piezas en una trompeta moderna, sólo tres de ellas son necesarias para identificarlo como un instrumento de viento - metal. Comenzando donde los labios introducen las oscilaciones del aire, las tres partes son la boquilla, la tubería y la campana. La longitud de la trompeta moderna es de aproximadamente 1.4 m, la mayoría es tubería cilíndrica. Sin embargo, las válvulas, que se encuentran a lo largo de la tubería, se utilizan para cambiar su longitud durante la ejecución. La acústica de la columna de aire dentro de la tubería cilíndrica está bien entendida, por lo que es lógico comenzar la discusión allí.

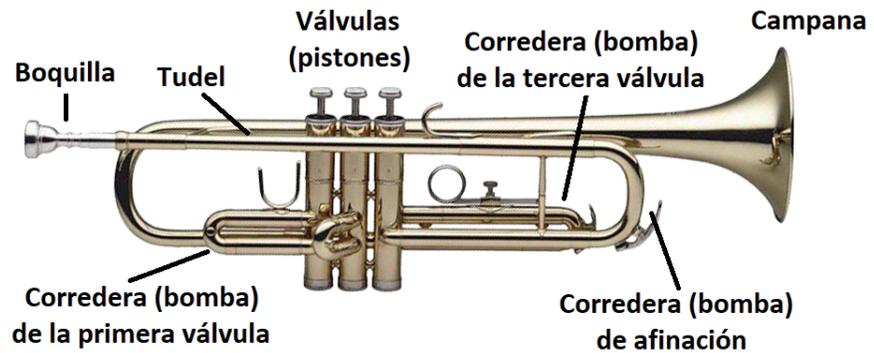


Fig. 1. Fotografía de una trompeta moderna. <https://purepng.com/photo/11424/objects-trumpet> .

Debido a que los labios imponen un antinodo de presión en un extremo del tubo y el otro lado está abierto a la atmósfera, la trompeta es un tubo abierto - cerrado. Por lo tanto, considerando sólo la tubería cilíndrica del instrumento, la longitud de onda fundamental de resonancia es cuatro veces la longitud del tubo. Los armónicos ocurren en los múltiplos impares de la frecuencia fundamental de resonancia como se espera. Los resultados de una simulación que calcula la impedancia de entrada de la columna de aire de un tubo cilíndrico de la longitud de la trompeta moderna se muestran en la figura 2a. Las resonancias de la columna de aire se pueden identificar por la máxima en la impedancia de entrada. La disminución de la altura de la máxima a medida que la frecuencia aumenta se debe a una pérdida de energía a la capa límite viscosa en la pared de la tubería y no a cualquier vibración física incidental de la tubería.

La impedancia de entrada se define como la relación de la presión con el flujo de volumen resultante del aire, por lo que una gran impedancia de entrada resulta en una onda de presión estacionaria debido a la reflexión desde el extremo del instrumento. Cuando la frecuencia de la vibración de los labios está cerca de una de estas resonancias, la retroalimentación tiende a forzar a los labios a vibrar a esa frecuencia. La retroalimentación de una trompeta moderna es tan fuerte que es extremadamente difícil forzar a los labios a oscilar en cualquier frecuencia que no sea la de una resonancia de la columna de aire. Una de las características de un buen trompetista es la capacidad para forzar una nota, es decir, hacer vibrar los labios a una frecuencia que no corresponde a la de resonancia del instrumento. Aunque es lógico preguntar por qué alguien querría tocar un instrumento fuera de resonancia, la importancia de esta habilidad se volverá obvia más adelante.

Para tocar la trompeta, es conveniente tener algo en que colocar los labios que no sea el borde afilado del tubo de metal. El pequeño orificio hace extremadamente difícil zumar los labios en el tubo, pero lo más importante, sin alguna interfaz intermedia, sus bordes harían que la profesión de trompetista sea corta. Esta interfaz entre el trompetista y el instrumento se llama la boquilla.

Las boquillas de los instrumentos modernos de viento - metal se forman típicamente de una pieza sólida de latón y tienen tres partes: copa o embudo, tudel y un orificio llamado como interior (figura 3). El exterior de la boquilla generalmente sigue el perfil del orificio, pero el punto en el que el labio toca la boquilla se hace mucho más grueso para proporcionar un cojín para los labios.

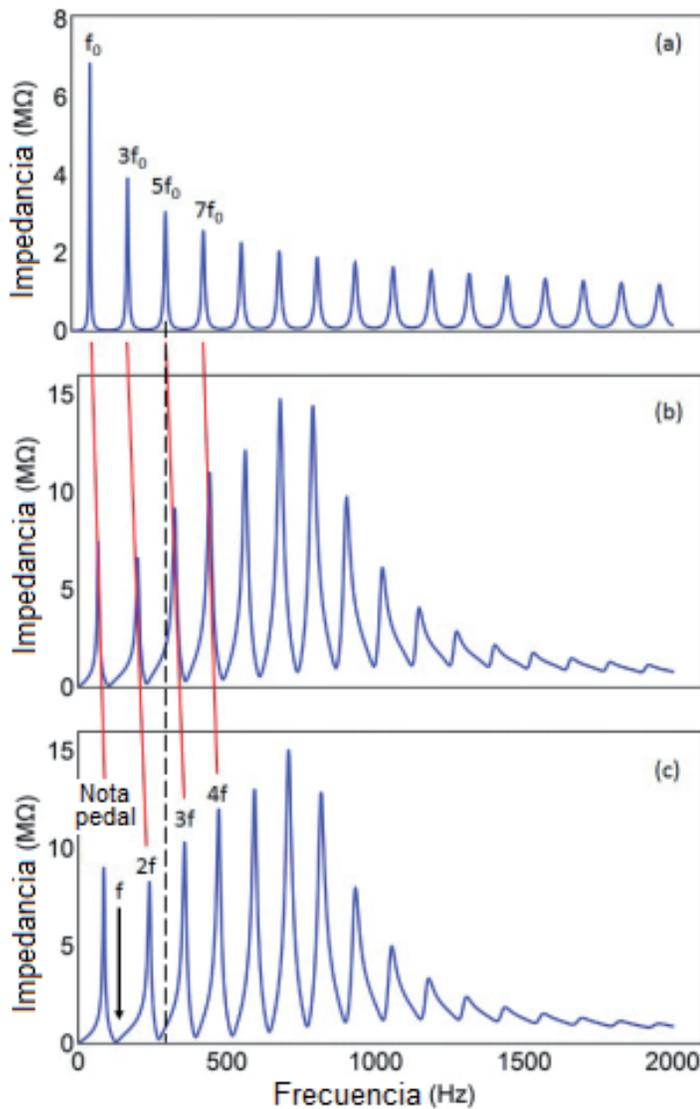


Fig. 2. Impedancia calculada en función de la frecuencia de un tubo cilíndrico de la longitud de una trompeta (a), una boquilla conectada a la pipa (b), y una boquilla, pipa, y campana (c). La longitud total se ha mantenido constante en los tres casos. f_0 (a) y f (c), frecuencia fundamental de la serie armónica.

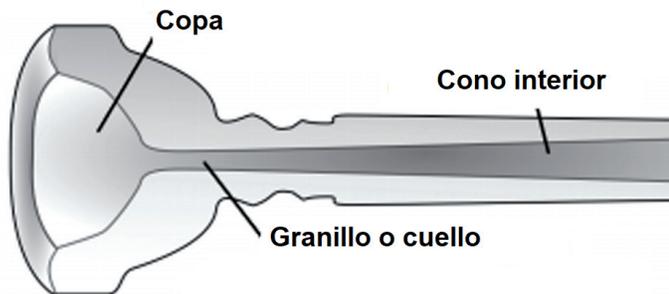


Fig. 3. Dibujo de una boquilla de trompeta con las piezas etiquetadas. Dibujo de D. Bolton, CC SA-BY 2.0.

La copa proporciona un volumen de aire acorde, el tudel introduce una inercia, y la cono interior actúa para expandir suavemente el diámetro del orificio desde el paso estrecho del tudel al más amplio de la tubería. Hay una sección de la tubería llamado *leadpipe*, (también es un tudel) que mide aproximadamente 25 cm de largo en una trompeta, que continúa esta expansión gradual del agujero hasta que sea igual al diámetro del tubo cilíndrica utilizado para la mayoría del instrumento. Sin embargo, la mayor parte de la expansión del orificio ocurre en la boquilla.

La inercia (impedancia donde la presión conduce al flujo por $\pi/2$ radianes) y la conformidad (flujo conduce a la presión por $\pi/2$ radianes) junto con la resistencia al flujo que es inherente en cualquier tubo (flujo y presión en fase) crea una resonancia tal como un inductor, condensador y resistencia crean un circuito eléctrico resonante. La figura 2b es una gráfica de la impedancia de entrada que ocurre cuando la boquilla está conectada a la tubería cilíndrica. En la simulación, la longitud de la tubería se ha acortado por la longitud de la boquilla para mantener la longitud total constante. Observe que el efecto de la boquilla es aumentar significativamente la impedancia de entrada entre 200 Hz y 1.5 KHz. Este rango de frecuencia representa el rango de sonido normal de la trompeta. Cuando los trompetistas desean tocar por encima del rango de frecuencia normal, suelen cambiar la boquilla a una con una copa menos profunda, lo que aumenta la frecuencia de resonancia de la boquilla y hace más fácil reproducir notas que son más altas en la escala musical. Los trompetistas profesionales pueden tener de tres a diez boquillas diferentes. Como regla general, cuanto mejor sea el trompetista menor será el número de boquillas utilizado, pero la mayoría de los trompetistas tienen al menos dos o tres que se utilizan regularmente.

Si se construyera un instrumento que consistiera sólo de una boquilla y la tubería, la gráfica en la figura 2b indica que sólo los armónicos fundamentales y los impares se podrían sonar. Hay un efecto menos obvio de cambiar las resonancias ligeramente de una manera que no es uniforme para que ya no sean exactamente armónicas, pero la construcción de tal instrumento demuestra que las resonancias todavía están cerca de la relación esperada. Desafortunadamente, el sonido irradiado de esta combinación es mínimo y el público casi no escucharía ningún sonido cuando se tocara. Para aumentar la eficiencia de la radiación, el extremo de la tubería se acampana. Esta forma aumenta la radiación en el aire para que el público pueda oír el instrumento, pero incluso con la campana puesta, la mayoría del sonido permanece dentro del instrumento.

La explicación de como está construida la trompeta está ahora completa, pero queda un punto por resolver. Los músicos saben que la mayoría de los instrumentos de viento - metal pueden sonar toda una serie armónica y no sólo los armónicos impares, aun así es conocimiento común que las resonancias de un tubo abierto - cerrado constituyen sólo los armónicos impares, como es evidente en la figura 2. Así, ¿Cómo un tubo de un cuarto de longitud de onda tiene resonancias que incluyen armónicos pares? La respuesta es que no puede, pero al diseñar sensatamente la campana, es posible cambiar las frecuencias de resonancia de tal manera que cuando se combina con el pequeño cambio atribuible a la boquilla los armónicos se convierten en una serie completa.

El diseño de las campanas de los instrumentos de viento - metal es todavía más arte que ciencia, pero entendemos la importancia del perfil del agujero creado

por la campana. Aunque es común considerar que la terminación acústica de un tubo se produce cerca de su extremo físico, en la campana, ondas de longitud más largas se reflejan en la región mucho antes del final real del instrumento. Además, a medida que la frecuencia aumenta, el nodo de presión final se desplaza hacia el final de la trompeta. Por lo tanto, acústicamente, el instrumento parece ser más corto que su longitud medida, pero la diferencia entre la longitud real y la longitud acústica cambia con la frecuencia. Cerca de las frecuencias más altas de la gama de juego la longitud acústica se acerca a la longitud real.

Este acortamiento de la longitud efectiva del instrumento causado por la parte acampanada desplaza las frecuencias de resonancia hacia arriba, pero no las desplaza a todas por igual. La campana está diseñada para que las frecuencias de resonancia sean cambiadas de tal manera que se vuelvan armónicamente relacionadas de una manera diferente. Los armónicos impares siguen siendo los únicos que se pueden producir, pero debido a que las frecuencias han sido cambiadas por la campana de una manera no lineal, producen una serie armónica completa. La única resonancia que no forma parte de esta serie armónica es la fundamental, que en lenguaje musical se conoce como la “nota pedal”. La frecuencia de la nota pedal es demasiado baja para ser parte de la serie armónica; por lo tanto, las resonancias se refieren como una serie armónica con un desafino fundamental. Esto se puede ver en la figura 2c donde se grafica la impedancia calculada de una trompeta completa. La nota pedal se indica en la figura como la frecuencia fundamental asociada a la serie armónica.

La campana tiene otra función que ayuda a crear el sonido único de cada instrumento. Refleja preferentemente el sonido de baja frecuencia. La mayor reflexión hace que las frecuencias bajas sean más predominantes en la columna de aire porque tienen un mayor efecto sobre el movimiento de los labios. Sin embargo, la campana también determina la frecuencia por encima de la cual la reflexión se vuelve insignificante; esta frecuencia se conoce como la frecuencia de corte. Así que aunque la forma de la campana es responsable de asegurar que haya más energía en las frecuencias en las resonancias más bajas que en las más altas dentro del instrumento, también es responsable de asegurar que un mayor porcentaje del sonido se irradie en frecuencias más altas.

Esta descripción de la trompeta se puede aplicar generalmente a casi todos los instrumentos de viento - metal. Sin embargo, hay variaciones que son únicas para cada instrumento y de estas variaciones resultan en sonidos que cubren una amplia gama de timbres. Las formas de las boquillas varían de un instrumento a otro, pero todas tienen copa, tudel y caña, y todas producen una resonancia en el rango de frecuencia que abarca el rango de sonido normal del instrumento. En contraste, la campana y la forma del orificio de los instrumentos de viento - metal pueden variar significativamente.

IMPORTANCIA DE LA FORMA DEL TUBO

La forma del tubo de cualquier instrumento se define por la forma de las paredes internas de la tubería que constriñe el aire. Como se ha dicho, la mayoría de la tubería en la trompeta es cilíndrica al igual que el diámetro del trombón. Sin embargo, no todos los miembros de la familia de viento - metal tienen forma cilíndrica. Algunos son cónicos y la mayoría tienen una combinación de

tubería cilíndrica y cónica antes de llegar a la sección de campana. Por ejemplo, la corneta se muestra en la figura 4. (Como en la figura 1, las líneas negras son producto de la iluminación y no parte del instrumento.) La corneta tiene una longitud significativa de tubos casi cónicos, que es claramente diferente del tubo cilíndrico en la trompeta que se muestra en la figura 1.



Fig. 4. Fotografía de una corneta moderna. La corneta tiene secciones de tubo cónico en contraste con el tubo cilíndrico de la trompeta. <https://purepng.com/photo/11418/objects-trumpet> .

Pocos instrumentos modernos son completamente cónicos o completamente cilíndricos, por lo que la forma de la tubería puede incluir secciones cilíndricas, cónicas y acampanadas. Muchos instrumentos modernos de viento - metal comienzan con algunos tubos cilíndricos seguidos de una sección cónica que puede ser una parte significativa de la longitud. Desde un punto de vista musical, estos instrumentos cónicos suenan más suaves que los instrumentos cilíndricos, y no es posible obtener el sonido clásicamente estridente de instrumentos que tienen un tubo cónico. Así la corneta, que tiene una sección grande del tubo cónico, no suena como una trompeta, especialmente cuando se toca fuerte.

Un buen ejemplo de la diferencia de sonido entre un instrumento cilíndrico y un instrumento cónico similar se puede escuchar en estas dos grabaciones de Brian Shook (Audio 1, <http://acousticstoday.org/tcdemo/>). Una trompeta fue usada en la primera grabación mientras que una corneta fue usada en la segunda. Note especialmente cerca del final de las grabaciones donde las notas más fuertes, más altas, entrecortadas hacen las diferencias en timbre más obvias. Aunque los dos instrumentos son de la misma longitud y tocan el mismo rango de tono, la diferencia en el sonido es sorprendente.

Es raro encontrar un instrumento moderno con una forma puramente cónica. Campbell *et al.*⁴ señalan que el corno alpino es un instrumento que es casi puramente cónico, pero parece ser único en este sentido. El clarín se acerca a ser completamente cónico, pero incluso aquí, se acampana al final en lugar de simplemente terminar en un cono. Sin embargo, varios instrumentos tienen secciones significativas del orificio que no son cilíndricas. La corneta, el fliscorno y la tuba son buenos ejemplos de instrumentos que caen en la rama cónica de la familia de viento - metal pero no son completamente cónicos.

La forma cónica en el tubo es importante por dos razones. Como se ha señalado, los instrumentos cónicos se caracterizan por tener un sonido suave y no suenan tan fuerte como los cilíndricos cuando se tocan fuerte. Los instrumentos cónicos como las cornetas, los fliscornos y las tubas no pueden producir el sonido corpulento clásico que se encuentra en los instrumentos cilíndricos como la trompeta y el trombón porque este sonido resulta de efectos no lineales que ocurren sólo en secciones cilíndricas largas de tubería.^{5,6} Además, en contraste con el perfil de tubo cilíndrico que sólo resulta en componentes armónicos impares, un tubo puramente cónico tiene resonancias que incorporan la serie armónica completa. Por lo tanto, el final de un instrumento puramente cónico no funciona para cambiar las resonancias en una relación armónica. Sin embargo, los instrumentos de viento - metal que son principalmente cónicos todavía tienen un timbre de acampanado por lo que la boquilla, la campana, y la tubería, todo debe funcionar en concierto para mantener los matices armónicamente relacionados.

VÁLVULAS Y CORREDERAS

El clarín, la corneta de posta o trompa de postillón, y el corno alpino son ejemplos de instrumentos que se tocan en una única frecuencia fundamental. Estos instrumentos tienen una longitud de tubo que no se puede cambiar, y por lo tanto, el repertorio se limita a los armónicos de la frecuencia fundamental, que se determina por la longitud del cuerno. Sin embargo, la mayoría de los instrumentos están diseñados para que el ejecutante pueda producir todas las notas dentro del rango del instrumento. Naturalmente, la longitud determina qué notas se pueden tocar, así que para que el instrumento abarque toda la escala musical, la longitud debe ser cambiada.

Cambiar la longitud es relativamente fácil, pero añadir y restar tubería rápidamente no es un proceso trivial. Gran parte de la historia del desarrollo de los instrumentos de viento - metal modernos implica varios intentos de cambiar rápidamente la longitud del instrumento. Algunos de los primeros instrumentos, tales como la serpiente que se muestra en la figura 5 utilizaron los agujeros que se cubrían con los dedos de forma parecida a una flauta dulce moderna. Las correderas, como las que se encuentran en el trombón, se originaron en el siglo XV como una forma rápida y fácil para cambiar la longitud del instrumento, pero esto sólo es práctico si hay una longitud significativa de tubo cilíndrico en el instrumento. La adición y sustracción manual de tubos de diferente longitud fue una práctica común entre los siglos XVI y XVIII, pero el proceso no es rápido y en el siglo XIX las válvulas evolucionaron como el método más económico y práctico para cambiar la longitud de los instrumentos de viento - metal. Hoy en día, el único instrumento orquestal de metal que no tiene válvulas para cambiar la longitud de la columna de aire es el trombón de corredera, aunque hay algunos instrumentos poco comunes como la trompeta de corredera que ocasionalmente aparecen en concierto.

Todos los instrumentos orquestales modernos de viento - metal tienen correderas de tubo que se pueden ajustar antes de empezar a tocar, pero están diseñadas para cambiar el tono ligeramente para afinar el instrumento con otros instrumentos. Típicamente, la extensión de la corredera está en el orden de 2 o 3 cm y una vez fijada, la posición se mantiene constante, ajustando sólo

ocasionalmente según los cambios de temperatura. Estas correderas, conocidas como correderas de afinación, se lubrican con una grasa pesada para que se puedan mover cuando se desee, pero permanecen en su lugar durante una actuación. Las correderas diseñadas para cambiar la nota reproducida, como las que se encuentran en los trombones, son fundamentalmente diferentes de las de afinación. Las correderas utilizadas para cambiar la nota que se toca representa una parte importante de la longitud del instrumento y se lubrican con aceite ligero para permitir su movimiento rápido.

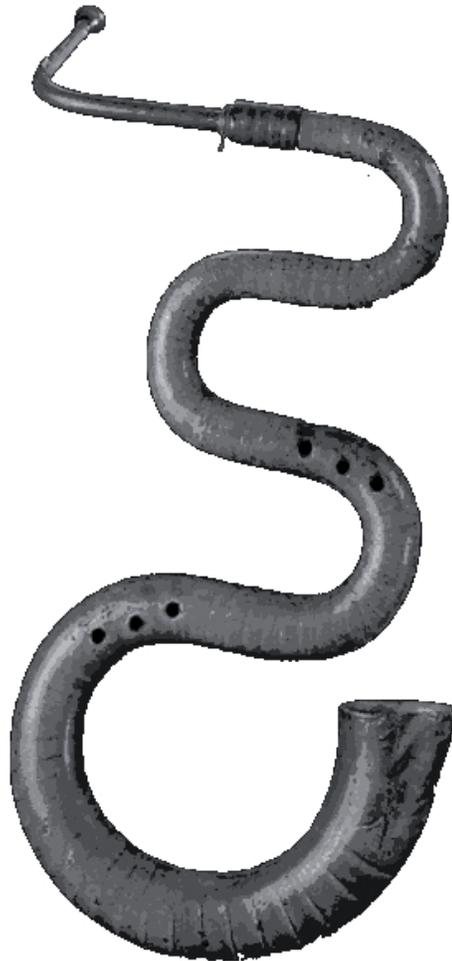


Fig. 5. Dibujo de un instrumento tipo serpiente hecha a principios del siglo XIX es un ejemplo de un *labrosone* con agujeros para los dedos. Basado en el instrumento expuesto por *The Metropolitan Museum of Art*.

En la mayoría de los instrumentos de viento - metal modernos, en lugar de una corredera, las válvulas se insertan en la parte cilíndrica de la tubería. Las válvulas pueden cambiar rápidamente la longitud de la columna de aire y requieren mucho menos espacio para funcionar. Las válvulas de pistón, como las que normalmente se encuentran en la trompeta y la corneta, son el tipo más común de válvula utilizada en instrumentos de viento - metal, pero algunos, como el

corno francés, tienen válvulas giratorias. Ambos tipos de válvulas tienen agujeros que corresponden a dos vías diferentes para que el aire fluya. En una válvula de pistón, éste se presiona directamente, mientras que las válvulas rotativas se giran presionando una palanca que cambia el movimiento lineal en movimiento rotatorio. Los diagramas de una válvula de pistón en ambas posiciones se muestran en la figura 6, ilustrando cómo la depresión de la válvula resulta en la adición de una sección de tubo para alargarlo.

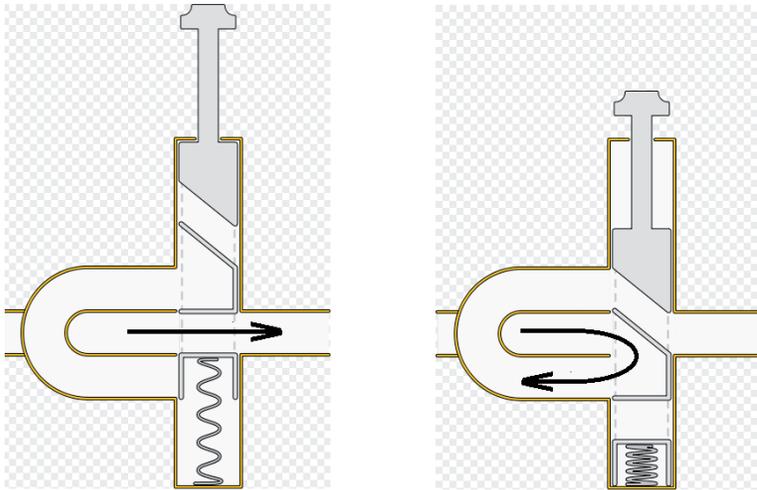


Fig. 6. Diagrama de una válvula de pistón en la posición abierta (izquierda) y oprimida (derecha). Cuando está oprimida, la columna de aire incluye una longitud extra de tubería. Las flechas indican la dirección del flujo de aire. Dibujo de A. J. Fijatkowski, CC SA-BY 2.5.

La elección del tipo de válvula es una decisión de ingeniería y sólo tiene un efecto mínimo sobre la acústica del instrumento, pero la colocación de la válvula tiene un efecto considerable, especialmente en instrumentos que no están hechos principalmente de tubería cilíndrica. Incluso si la expansión de la sección de la tubería es gradual, interrumpirla para insertar una sección de tubo cilíndrico tiene consecuencias acústicas significativas.

Puede que no sea obvio por qué se elegirían válvulas sobre correderas, o viceversa, al diseñar un instrumento, pero hay ventajas y desventajas para cada una. Por ejemplo, las correderas no son viables en instrumentos cónicos y las válvulas se pueden oprimir mucho más rápidamente de lo que se puede mover una corredera. Sin embargo, en los instrumentos con válvulas, la elección de cuánta tubería añadir a la columna de aire la fija el fabricante. Las correderas, por otro lado, son más lentas de mover y ocupan más espacio que las válvulas, pero tienen la capacidad de cambiar la longitud de una manera continua.

Se puede argumentar que se necesita un músico más hábil para tocar un instrumento de corredera que uno con válvulas porque hay infinitas posiciones de desplazamiento. Al igual que un violinista debe ser consciente de la afinación de cada nota mientras que el guitarrista simplemente tiene que presionar la cuerda entre los trastes, el trombonista no puede confiar en simplemente pulsar las válvulas correctas. Esta afirmación no es válida, sin embargo, porque es imposible hacer un instrumento con válvulas perfectamente afinado.

Para entender el problema con la adición de tubería utilizando válvulas, es ilustrativo volver al ejemplo de la trompeta. Una trompeta típica tiene tres válvulas. Idealmente, la segunda válvula baja la frecuencia sonora aproximadamente un semitono, lo que equivale a bajar una tecla en un piano (Audio 2, <http://acousticstoday.org/semi/>); la primera válvula baja la frecuencia aproximadamente dos semitonos (Audio 3, <http://acousticstoday.org/ws/>); y presionando la tercera válvula baja la frecuencia aproximadamente cuatro semitonos (Audio 4, <http://acousticstoday.org/2-steps/>). La idea es que al oprimir diferentes combinaciones de estas válvulas, un trompetista puede hacer sonar cualquier nota en la escala occidental.

El problema con el uso de válvulas se hace evidente cuando se comienza a calcular la longitud necesaria que cada válvula debe insertar en la columna de aire. Para bajar el tono en un semitono, debe cambiar la longitud en un 5.95%. Una trompeta típica es de unos 140 cm de largo, por lo que añadir 8.3 cm a la longitud bajará el tono precisamente donde debe estar. Para bajarlo dos semitonos, es necesario aumentar la longitud en un 12.25%, o alrededor de 17.2 cm, para la trompeta moderna. Si desea bajar el tono tres semitonos, parece lógico que presione la segunda válvula para bajar el tono por un semitono y luego presione la primera válvula para bajarlo por dos. Por desgracia, pulsando la primera válvula añade alrededor de 6% a la longitud de la trompeta y es necesario añadir 12.25% de la longitud total para luego bajar el tono 2 semitonos más. Así que la longitud necesaria para bajar el tono por uno o dos semitonos será diferente dependiendo de qué otras válvulas están oprimidas. En el caso de la trompeta, la longitud añadida necesaria cuando se presiona la primera y segunda válvula juntas es de 26.5 cm en lugar del valor combinado de 25.5 cm. Esto presenta un desafío tanto para el fabricante de instrumentos y el músico.

Para resolver este problema, la mayoría de los instrumentos de viento - metal están diseñados de manera que la tubería insertado por la opresión de cualquiera de las dos primeras válvulas es ligeramente más larga de lo que debería ser si fuera la única válvula que está oprimida. De esta manera, la longitud es ligeramente mayor de lo que debería ser cuando las válvulas se utilizan de forma independiente y ligeramente más corta de lo que debería ser cuando las válvulas se utilizan en combinación. Corresponde al ejecutante tocar el instrumento ligeramente fuera de la resonancia para lograr el tono correcto. Como ya se mencionó, esto no es fácil porque la retroalimentación a los labios los obliga a oscilar a la frecuencia de resonancia definida por la columna de aire.

Se necesita habilidad, pero cuando se utilizan las dos primeras válvulas, un buen ejecutante aprende a forzar las notas y tocar el tono correcto no es una expectativa irrazonable. Desafortunadamente, cuando se agrega la tercera válvula a la mezcla, se vuelve irrazonable esperar que incluso el mejor trompetista fuerce las notas lo suficiente para tocar en sintonía. Por lo tanto, la longitud de la tubería añadida presionando la tercera válvula se elige para ser aproximadamente lo que se requiere para bajar la configuración de la válvula abierta tres semitonos (Audio 5, <http://acousticstoday.org/three/>) y una corredera capaz de movimiento rápido se añade a la tubería asociada con esta válvula. En la trompeta, la corredera se mueve con el dedo anular, pero en instrumentos más grandes como la tuba, el ejecutante por lo general sólo agarra la corredera con su mano libre y la mueve

según sea necesario. Muchas trompetas, como la que se muestra en la figura 1, también incluyen una corredera larga para la primera válvula, que se opera con el pulgar.

A lo largo de los años, ha habido varios intentos de abordar el problema de las válvulas desafinadas, con un éxito limitado. Adolphe Sax inventó un instrumento de viento - metal con seis válvulas que no sólo añade tubería al instrumento, sino que reemplaza casi toda la longitud cuando la válvula está oprimida. Este arreglo, mostrado en la figura 7, es como tener siete instrumentos diferentes disponibles para el ejecutante y por lo tanto elimina el problema de desafinar porque nunca se tiene más de una válvula oprimida a la vez. Para bien o para mal, la idea nunca se hizo realidad.



Fig. 7. Trombón de seis válvulas fabricado por Adolphe Sax 1866. 2010.33.6. El instrumento no sufre de los problemas de entonación de otros instrumentos con válvula porque las válvulas nunca se utilizan en combinación. *Musée de l'Armée (Francia)* Creative Commons Attribution-Share Alike 2.0 France license.

REFLEXIONES FINALES

La acústica de los instrumentos de viento - metal se ha estudiado durante casi dos siglos, y muchos de los detalles interesantes no se han discutido aquí. Son instrumentos realmente fascinantes. Pero si bien gran parte de la física de los

instrumentos de viento - metal se entiende bien, sería engañoso dejar la impresión de que no hay preguntas abiertas. Un área importante que todavía está presta para la investigación se refiere al movimiento de los labios durante la ejecución y cómo el instrumento interactúa con ellos. Ha habido trabajo importante en esta área, pero todavía hay mucho que no entendemos.⁷⁻⁹ Del mismo modo, casi todos los ejecutantes de estos instrumentos creen firmemente que los efectos de las vibraciones del instrumento tienen un efecto significativo en el sonido. Esto ha demostrado ser cierto en el caso de las vibraciones de la campana¹⁰ y se ha propuesto una teoría para explicar el efecto,^{11,12} pero no está claro que las vibraciones de otras partes del instrumento afecten al sonido.

Hay muchas cosas que los músicos piensan que son importantes pero sobre las cuales muchos científicos son escépticos. Por ejemplo, de una breve discusión con casi cualquier ejecutante experto rápidamente surgirá una opinión sobre la importancia del flujo de aire continuo. El aire debe pasar a través del instrumento durante la ejecución, pero esto es sólo un subproducto de los labios zumbadores. Al colocar un diafragma de goma entre la boquilla y la tubería, se puede demostrar que el flujo de aire no es necesario para producir el sonido. Todo lo que se necesita es que las oscilaciones de presión se propaguen por el tubo. Sin embargo, casi todos los músicos creen que el flujo del aire es crítico para el sonido. Muchos científicos están menos seguros.

Entendemos la física básica de cómo los instrumentos de viento - metal producen sonido y reconocemos que todavía hay preguntas interesantes en que insistir; sin embargo, es importante recordar que los instrumentos de viento - metal no son instrumentos científicos. Son tocados por artistas y su valor radica en su capacidad para ayudar a un humano a hacer música. La capacidad de estos instrumentos para hacer música motiva la investigación, pero aquellos de nosotros que estudiamos la física de los instrumentos musicales estamos de acuerdo en que la música debe disfrutarse sin pensar en la acústica complicada que produce el sonido. Guardamos esos pensamientos para después del concierto.

AGRADECIMIENTOS

Estoy en deuda con el Dr. Brian Shook, *Vincent Bach Performing Artist y Clinician* y Profesor Asociado de Música en la Universidad Lamar, quienes generosamente proporcionaron todos los archivos de sonido (www.brianshook.com).

REFERENCIAS

- 1 Zhang, J., Xiao, X., and Lee, Y. K. (2004). The early development of music. Analysis of the Jiahu bone flutes. *Antiquity* 78, 769-778.
2. Atema, J. (2014). Musical origins and the stone age evolution of flutes. *Acoustics Today* 10, 26-34.
3. Baines, A. (1976). *Brass Instruments: Their History and Development*. Faber and Faber, London. Dover reprint, 2012.
4. Campbell, M., Greated, C., and Myers, A. (2006). *Musical Instruments: History, Technology and Performance of Instruments of Western Music*. Oxford University Press, New York.

5. Hirschberg, A., Gilbert, J., Msallam, R., and Wijnands, P. J. (1996). Shock waves in trombones. *The Journal of the Acoustical Society of America* 99, 1754-1758.
6. Myers, A., Pyle, R. W., Gilbert, J., Campbell, D. M., Chick, J. P., and Logie, S. (2012). Effects of nonlinear sound propagation on the characteristic timbres of brass instruments. *The Journal of the Acoustical Society of America* 131, 678-688. doi:10.1121/1.3651093.
7. Boutin, H., Fletcher, N., Smith, J., and Wolfe, J. (2015). Relationship between pressure, flow, lip motion, and upstream and downstream impedances for the trombone. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137, 1195-1209. doi:10.1121/1.4908236.
8. Stevenson, S., Campbell, M., Bromage, S. Chick, J., and Gilbert, J. (2009). Motion of the lips of brass players during extremely loud playing. *The Journal of the Acoustical Society of America* 125, EL152-EL157. .
9. Yoshikawa, S. (1995). Acoustical behavior of brass player's lips. *The Journal of the Acoustical Society of America* 97, 1929-1939.
10. Moore, T. R., Shirley, E. T., Codrey, I. E. W., and Daniels, A. E. (2005). The effects of bell vibrations on the sound of the modern trumpet. *Acta Acustica united with Acustica* 91, 578-589.
11. Kausel, W., Chatziioannou, V., Moore, T. R., Gorman, B. R., and Rokni, M. (2015). Axial vibrations of brass wind instruments bells and their acoustical influence: Theory and simulations. *The Journal of the Acoustical Society of America* 137, 3149-3162. doi:10.1121/1.4921270.
12. Moore, T. R., Gorman, B. R., Rokni, M., Kausel, W., and Chatziioannou, V. (2015). Axial vibrations of brass wind instruments bells and their acoustical influence: Experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America* 138, 1233-1240. doi:10.1121/1.4928138.