

# Introducción a la acústica de los instrumentos de viento-metal



PASs 43.75.Fg

Vicente Pastor  
Conservatorio Superior Joaquín Rodrigo  
Valencia  
'pastorcivene@yahoo.es'

## Resumen

El sistema acústico de los instrumentos de viento-metal constituye un diseño simple comparado con sus homólogos de madera o con los cordófonos. Esta particularidad, junto con la naturaleza de las columnas aéreas, induce en el instrumento un funcionamiento acústico que no está exento de ciertos efectos secundarios que desvían las relaciones armónicas entre sus frecuencias de resonancia, lo que requiere una contribución adicional del músico. El presente artículo pretende aproximar al músico de viento-metal a la acústica de su instrumento, pero también al físico interesado en estos temas. Para ello se introducen los fundamentos acústicos necesarios para facilitar la comprensión del artículo, teniendo en cuenta el carácter interdisciplinar del mismo, y se describe y analiza el funcionamiento del sistema acústico y sus elementos constitutivos, los factores a considerar en el diseño y la calidad tonal, así como las desviaciones del modelo geométrico ideal que es preciso considerar en el estudio y diseño de estos instrumentos.

## 1. Introducción

La simbiosis entre instrumento e instrumentista que se materializa formidablemente en los cantantes, solo puede ejemplificarse en los instrumentos de viento-metal donde el instrumentista también participa de las vibraciones sonoras con sus labios. Del mismo modo que un cantante tiene que pensar una nota antes de cantarla, el músico de viento-metal debe realizar un ejercicio previo de afinación antes de emitir la nota deseada. Sin embargo, en estos instrumentos las vibraciones del labio se hallan fuertemente influenciadas por las propiedades acústicas de

la columna de aire contenida en el tubo, a diferencia de las cuerdas vocales donde la influencia de las resonancias del tracto vocal sobre la vibración de aquellas es mínima.

Efectivamente, el instrumentista de viento-metal contribuye activamente en el proceso de producción sonora de su instrumento. La frecuencia de vibración de sus labios se somete en mayor o menor medida a la resonancia dominante del cuerpo, y los armónicos de la vibración del labio deben encontrar las frecuencias de resonancia del tubo para excitarlas. De cómo tenga lugar esa colaboración dependerá la calidad del tono resultante. Desde luego la proporción de control sobre la selección de la frecuencia de vibración del sistema es mayor en estos instrumentos que en el grupo de las maderas. Nótese que el aire encerrado en el tubo tiene una masa considerable y por lo tanto es capaz de obligar a la caña a cerrarse sobre la frecuencia natural de la columna de aire, del mismo modo que los labios del instrumentista presentan una masa apreciable que le permite un mayor control sobre la frecuencia. Por esta razón, aumentando la tensión del labio el músico puede excitar los modos más altos de vibración de la columna aérea.

Esta es una de las características básicas de estos aerófonos. Una segunda característica viene dada por la heterogeneidad de su geometría. Cada uno de los miembros de la familia constituye un diseño particular producto de la evolución empírica. Tubos cilíndricos, cónicos o exponenciales con modificaciones parciales, o bien especímenes híbridos, son necesarios para obtener las frecuencias de resonancia de una serie completa, a diferencia de las maderas donde estas correcciones se introducen deliberadamente para ajustar determinados tonos anómalos por el empleo de los orificios y el efecto de la corrección del extremo abierto al que va asociado<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> En una columna de aire la conexión con el aire de fuera del tubo no se lleva a cabo siempre de forma neta determinando la longitud acústica del tubo en ese punto, antes bien, el diámetro del orificio, la frecuencia, la longitud del tubo, etc., influyen sobremanera en este proceso. Así, si bien es cierto que para las frecuencias bajas el orificio tonal abre el taladro al aire externo acortando eficazmente la longitud del tubo, debido a que el agujero proporciona una impedancia baja al aire externo para que se produzca esa conexión justo donde el tubo se abre al exterior, para las frecuencias altas, sin embargo, esto es más complejo.

Otra cualidad acústica de estos instrumentos la constituye su mecanismo de obtención de sonidos. Para determinar la altura de la nota que se quiere tocar estos aerófonos introducen longitudes adicionales de tubo mediante el uso de válvulas o varas. Por otro lado, aunque utilizan más resonancias del tubo que sus homólogos de madera, su mecanismo de obtención de notas limita su agilidad técnica en relación con aquéllos e introduce desviaciones del modelo ideal.

Una última propiedad acústica: comienzan su escala con la mitad de la longitud de onda del fundamental, esto es, con el segundo armónico y, por tanto, la resonancia fundamental se halla inhabilitada, a no ser que se obtenga como una nota pedal. Así, sus mecanismos de obtención de notas (válvulas y varas) solo deben cubrir el intervalo de quinta entre el segundo y tercer armónico, lo que explica su simplicidad.

## 2. Principios acústicos

El sonido en los instrumentos musicales depende de la presencia de vibraciones en frecuencias estables. Estas oscilaciones vienen determinadas fundamentalmente por tres factores: el desplazamiento, la fuerza restauradora y algún mecanismo para trabajar en oposición a esa fuerza de restauración. El primer factor viene dado por la energía mecánica que transmite la perturbación a las moléculas gaseosas; el segundo, está determinado en los instrumentos musicales por la elasticidad o la resistencia de los materiales vibrantes<sup>2</sup>; el tercero depende de la inercia, entendida como la tendencia de un objeto para permanecer en movimiento en ausencia de cualquier fuerza de resistencia.

Para entender estos factores piénsese en el movimiento simétrico y periódico de un péndulo. Si desplazamos un péndulo a un lado, una fuerza restauradora -la gravedad- hace que se balancee hacia su posición inicial, pero su inercia le lleva más allá, conduciendo al desplazamiento en otra dirección. Si no se le suministra más energía, la fuerza restauradora vence a la inercia hasta que el péndulo se detiene.

Sin embargo, cuando hablamos de las oscilaciones de las partículas que se producen en el interior del tubo de un aerófono, sus períodos son muy pequeños dado que las oscilaciones son muy rápidas<sup>3</sup>. En este caso se denominan *vibraciones* y el movimiento correspondiente *movimiento vibratorio*.

El caso más sencillo de movimiento oscilatorio se denomina *movimiento vibratorio armónico* y se produce

cuando la fuerza resultante que actúa sobre el sistema es una fuerza restauradora lineal que es proporcional al desplazamiento experimentado por el cuerpo<sup>4</sup>. En este supuesto, la fuente vibrante -el sistema labio-boquilla- induce a las moléculas gaseosas próximas a oscilar con movimiento armónico simple alrededor de sus posiciones de equilibrio. Debido a su propiedad elástica, la molécula vuelve a su posición inicial. A continuación interviene una propiedad inercial del medio -o de la partícula-, que viene dada por su densidad, que le conduce al otro extremo de su oscilación. Una característica que tiene este movimiento la constituye su periodicidad temporal y espacial -se repite con la distancia-. Si no fuese así, estaríamos hablando de ruido y no de sonido.

A diferencia de un sólido, en un medio gaseoso la onda viaja merced a variaciones de la densidad y presión del aire. Como la presión del gas es proporcional a su densidad, cuando las moléculas se golpean entre sí para transmitir la energía sonora, la presión y densidad es máxima, zonas denominadas vientres, y cuando se separan la presión y densidad es mínima, zonas llamadas nodos. Por tanto, en un gas la propagación sonora se produce mediante *pulsos u ondas de presión*.

Ahora bien, cuando cualquier instrumento toca una nota sostenida de afinación estable su cuerpo sonoro no solo se excita en una frecuencia, sino en varias frecuencias, o dicho de otro modo, la molécula no se mueve en una sola dirección sino que realiza múltiples movimientos en diversas direcciones y frecuencias, lo que da lugar a un *movimiento vibratorio complejo*. En este caso, cada vibración de la molécula origina una *onda armónica* con la misma frecuencia. La relación que une a todas estas frecuencias es que deben seguir un patrón para ser consideradas útiles musicalmente: *la serie armónica*.

La explicación de este fenómeno reside en el *principio físico-armónico* que dice que una vibración de una cuerda cuya longitud es una parte alícuota de ésta produce tonos que suenan armónicamente con la vibración completa o de máxima longitud. Es fácil deducir, que la longitud de una cuerda se divide en fracciones enteras cuyas frecuencias vibratorias son múltiplos enteros de aquélla<sup>5</sup>. De esta relación los teóricos deducen la *serie o escala de los armónicos*, constituida por una serie de intervalos musicales en orden ascendente cada vez más pequeños: el primero corresponde a vibración más larga, el segundo a la 1ª subdivisión de la vibración fundamental en un relación de frecuencia de 2/1, el tercero a la segunda subdivisión en una relación de frecuencia de 3/2, etc.

---

<sup>2</sup> Generalmente viene dado por la gravedad.

<sup>3</sup> El período es una magnitud que mide el tiempo que invierte una molécula en completar un ciclo, esto es, el trayecto a cada uno de sus lados y vuelta a la posición de equilibrio.

<sup>4</sup> Esta proporcionalidad viene enunciada por la Ley de Hooke, que recibe su nombre de Robert Hooke, físico británico contemporáneo de Isaac Newton.

<sup>5</sup> El matemático Fourier desarrolló un tipo de análisis matemático por el que cualquier onda periódica compuesta puede descomponerse en una suma de ondas senoidales de amplitud, frecuencia y fase adecuadas. La onda periódica compuesta a la que se refiere Fourier es el resultado de la vibración libre de la cuerda y las diversas ondas senoidales son los diversos tonos emitidos por dicha cuerda.

Volviendo al proceso sonoro, para que se engendre el *sonido armónico*, es necesario que la *onda armónica* que ha sido generada por el *movimiento armónico simple* de una molécula de gas, reflexione en el extremo del tubo y vuelva en sentido contrario, originando así *interferencias* con las ondas incidentes<sup>6</sup>, lo que da lugar a una onda resultante que tiene unas características especiales y que recibe el nombre de *onda estacionaria*<sup>7</sup>. Cada una de estas ondas estacionarias tiene una frecuencia particular que recibe el nombre de *frecuencia natural de resonancia o armónico* del sistema o cuerpo resonante. La frecuencia de resonancia más grave se denomina *fundamental*  $f_1$  o *primer armónico*; la siguiente *segundo armónico*, con una frecuencia doble respecto de la fundamental; la tercera más aguda, tercer armónico, con una frecuencia triple; y así sucesivamente se obtienen varios armónicos, cuyo número e intensidad dependerá de los parámetros físicos del sistema.

La onda estacionaria mantiene el sonido dentro del instrumento y una pequeña fracción, en torno al 1 o 2% del total de la energía sonora, se irradia al exterior, cada vez que una onda reflexiona en el extremo abierto, como el sonido que llega al oyente. Una cantidad mayor de energía se pierde debido a fricciones de la materia viscosa con las paredes del tubo y a intercambios de calor que suceden debido a que las paredes del tubo tienen prácticamente una temperatura constante, mientras que la temperatura en el gas fluctúa<sup>8</sup>.

El concepto de onda estacionaria se halla íntimamente relacionado con el de *resonancia*, ya que cuando se dice que un cuerpo ha entrado en resonancia con otro es porque se ha establecido una onda estacionaria en su interior con una frecuencia igual o muy cercana a la del cuerpo excitador. Por tanto, el concepto de resonancia refiere la respuesta reforzada de un sistema oscilante a una fuerza motriz en o cerca de cada una de sus frecuencias naturales.

La resonancia tiene ciertas propiedades que podemos aplicar a estos instrumentos. Una de ellas consiste en la capacidad de elección de las frecuencias resonantes de un sistema para vibrar en aquellas frecuencias, inhibiendo otras frecuencias presentes en la excitación. La otra característica básica de un cuerpo que vibra en su frecuencia natural es que lo hará también en varias frecuencias múltiples relacionadas armónicamente con la fundamental, de conformidad con el principio físico-armónico. Por consiguiente, de acuerdo con estas propiedades los armónicos desempeñan dos funciones en el proceso sonoro: por un lado, colorear el sonido y, por tanto, caracterizar el timbre del instrumento; por otro, funcionar como notas independientes para constituir la escala del instrumento. Las resonancias de un ins-

trumento tubular pueden observarse mediante la denominada *curva de impedancia o de resonancia* que cuantifica la presión sonora generada por una onda sonora de una frecuencia determinada. En ella se observan una serie de picos que corresponde a los armónicos que pueden ser emitidos como notas de la escala.

En cuanto a los tubos sonoros, existe una gran variedad de formas, pero sólo tres son comúnmente utilizados para fines musicales: *el cilindro abierto, el cilindro cerrado y el cono*. La diferencia básica entre ellos es que el cilindro cerrado produce solo los armónicos impares, mientras que el cilindro abierto y el cono presentan los mismos armónicos. Además, en el cilindro la propagación es plana y, por tanto, la intensidad y la velocidad se mantienen constantes, mientras que en el cono la propagación se considera esférica y, por consiguiente, la perturbación se extiende sobre el área de una esfera que es proporcional al  $r^2$ . Luego su intensidad decrece como  $1/r^2$ , o dicho de otro modo, disminuye con el cuadrado de la distancia<sup>9</sup>. Además, para la parte baja del tubo utilizan una forma exponencial.

La trompeta y el trombón representan a los cilindros, mientras que la trompa y especialmente la tuba representan a los conos. Los armónicos de los instrumentos de metal modernos tienen básicamente las mismas frecuencias que un cono, ya que se han introducido secciones cónicas en los tubos cilíndricos que permiten obtener todas las frecuencias. Las excepciones son la fundamental o la nota de pedal, y los tonos más agudos.

### 3.El sistema acústico y su funcionamiento

En un instrumento de viento las vibraciones generadas por el sistema labio-boquilla son dominadas por las resonancias del tubo, y estas, a su vez, determinan la afinación y la composición espectral del sonido en colaboración con otros factores. Por consiguiente, las oscilaciones en el interior de un tubo dependen de la interacción entre la columna de aire y su excitador. Para que se produzca un tono con una óptima calidad en cualquier aerófono deben darse tres condiciones: una, que la mayor parte de la energía que transporta la onda se refleje en el extremo abierto para que se produzcan interferencias que den lugar a las ondas estacionarias o a la resonancia; dos, que las frecuencias de resonancia o armónicos del tubo sigan la serie armónica, ya que de esta forma podrán colaborar en la vibración; y tres, que una de estas frecuencias se enganche con una frecuencia natural de vibración del labio para mantener la resonancia del tubo. Si se cumplen estas tres condiciones se establecerá un régimen de oscilación que permitirá la emisión de un sonido estable y rico<sup>10</sup>.

<sup>6</sup> Este fenómeno se rige por el principio de superposición que dice que cuando dos o más ondas coherentes se encuentran en el espacio, sus perturbaciones individuales se superponen y se suman creando una nueva onda.

<sup>7</sup> A diferencia de las ondas armónicas viajeras, este tipo de ondas no viajan en el medio, de ahí su nombre, y por lo tanto no transportan energía.

<sup>8</sup> La temperatura de las moléculas aumenta cuando se comprimen y disminuye cuando se mueven hacia los lados.

<sup>9</sup> PASTOR, Vicente: "Los instrumentos de viento-madera y su acústica", Revista Música y Educación, 69, 2007.

<sup>10</sup> De acuerdo con el célebre acústico A. Benade, un régimen de oscilación es aquel estado del movimiento colectivo de una masa de aire en la que un mecanismo de excitación no lineal –en el que no existe proporcionalidad entre el estímulo y la respuesta del sistema– colabora con un juego de modos resonantes del cuerpo para mantener una oscilación estable, la cual contiene varios componentes de frecuencia armónicamente relacionados, cada uno con su propia amplitud definida.

Tradicionalmente los instrumentos de viento-metal siempre han adolecido problemas de afinación debido al uso de los armónicos naturales obtenidos mediante sobrepoplado. Esta inconveniencia ha constituido el reto de los músicos y fabricantes en el diseño de un instrumento más perfeccionado. En este sentido, estos instrumentos han ido evolucionando intuitivamente, experimentado con todo tipo de mecanismo para obtener los armónicos con cierta calidad tonal: el *clarín* o *cornetto* del renacimiento y barroco, al igual que el serpentón con forma curvada se construían de madera, con un tubo cónico largo, una serie de orificios y sin pabellón. El uso del cono permitía que las frecuencias de resonancia se subieran y, además, que se situaran más próximas. Sin embargo, este diseño acarrea problemas en la emisión y afinación de los armónicos más agudos dado que, al situarse más cerca en la serie armónica, la selección y obtención de estos sonidos se complicaba. Con la invención de los *tonillos* por el trompista Hampel en 1753 se resolvía parcialmente el problema, aunque este mecanismo, consistente en disponer de una serie de segmentos de tubo de diferentes longitudes que se introducían manualmente en el instrumento, acarrea otras complicaciones prácticas.

Para solucionar estos problemas y conseguir un instrumento que pudiera obtener todos sus armónicos de forma afinada, se evolucionó hacia un diseño con tres secciones (fig. 1): una boquilla que tiene una pequeña sección formada por una copa y una constricción, y que constituye el mecanismo de excitación en colaboración con el labio del músico; una sección de tubo curvado con un diámetro constante donde se ubican el mecanismo de obtención de notas -las válvulas o varas-; y una larga sección cónica, en el otro extremo, que se abre exponencialmente y se termina en una campana, cuya función básica consiste en radiar el sonido, amén de contribuir al ajuste de ciertas resonancias a la serie armónica.

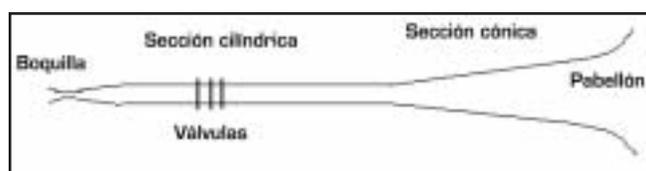


Fig. 1 Diseño simplificado del sistema acústico de un aerófono de metal moderno.

### 3.1 Generador de la excitación: sistema labio-boquilla

El generador acústico en los instrumentos que nos ocupan está constituido por el sistema labio-boquilla y vibra gracias a la presión estática. Este dispositivo controla el flujo de aire suministrado por el instrumentista y está caracterizado por actuar únicamente sobre una gama de fre-

cuencias muy estrecha, que se sitúa justo por encima de la frecuencia natural de los labios, a diferencia de los generadores de lengüeta que operan en una amplia gama de frecuencias que se extiende desde las frecuencias bajas hasta casi la frecuencia de resonancia de la caña<sup>11</sup>.

Otra propiedad acústica de estos sistemas de excitación, que será tratado en el apartado siguiente, es que responden de forma no lineal, es decir, el flujo que convierten en oscilaciones no varía de forma proporcional a la presión acústica generada.

La fuente de energía o corriente continua al instrumento está suministrada por el instrumentista mediante un flujo de aire con una presión que se sitúa por encima de la atmosférica. Estableciendo una analogía con la energía eléctrica, esta energía suministrada por el instrumentista debe transformarse en una energía vibratoria o corriente alterna. El labio actúa como una válvula que genera un componente oscilante que transforma el flujo en una energía vibratoria, esto es, en oscilaciones. Esta conversión se produce debido al cierre y apertura periódica de los labios en respuesta a las variaciones acústicas dentro de la boquilla.

El proceso de formación de la onda estacionaria en el tubo se origina con la generación de una onda de presión, producida por la apertura de la boca del instrumentista, que viaja a la parte baja del tubo. Cuando alcanza el extremo abierto, la onda de presión se encuentra con una barrera de aire, originada por la diferencia de medios, que se opone a su propagación<sup>12</sup>. Como consecuencia de ello, la onda de presión baja es reflejada en un punto donde el tubo se abre al exterior y una rarefacción regresa al extremo superior para que una nueva perturbación inicie su ciclo. Así, para completar un ciclo y poder emitir las notas del registro grave se requiere un viaje de ida y vuelta<sup>13</sup>.

La proporción de energía que se refleja o se difracta depende de la relación que se establece entre la longitud de onda y el diámetro de la abertura. En este sentido, conviene que esta relación sea considerable ya que de esta forma la abertura se convertirá en un radiador eficiente al tiempo que una gran proporción de energía sonora se reflejará, dado que todo el caudal sonoro no podrá aliviarse por la abertura. Téngase en cuenta que es necesario que la mayor parte de la energía se refleje para contribuir a establecer y mantener la onda estacionaria, matriz del sonido, ya que de esta forma el tubo podrá disponer de un mayor número de armónicos que podrán colaborar en el funcionamiento del sistema.

<sup>11</sup> FLETCHER, Neville H. y ROSSING, Thomas D.: *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer-Verlag, 1998, pág. 477.

<sup>12</sup> Esta resistencia puede medirse mediante la impedancia acústica, que se obtiene de la razón entre la fluctuación de presión y la velocidad del volumen del fluido.

<sup>13</sup> Aunque en los cilindros cerrados, como el caso de la trompeta y el trombón, las frecuencias de resonancia deberían seguir los números impares de la serie -y por tanto deberían realizar dos viajes de ida y vuelta para completar un ciclo-, las modificaciones cónicas introducidas en el tubo desvían este comportamiento y lo ajustan al de un cono. De esta forma, los armónicos que obtienen estos instrumentos son los mismos que los de un cono o un cilindro abierto.

En la figura 2 se ilustra el proceso de un ciclo de vibración de un generador labio-boquilla que origina una onda de presión en el tubo: en la primera secuencia la presión dentro de la boca se halla por encima de la presión atmosférica, lo que induce a los labios a abrirse, expulsando el aire repentinamente; esta acción disminuye la presión en la boca y aumenta la presión del aire dentro de la boquilla; en la tercera secuencia la tensión en los labios los obliga a cerrarse; se completa el ciclo en la última secuencia y una perturbación comienza su viaje en el tubo debido a las variaciones de presión entre la boca del instrumentista y la boquilla. Así, en un ciclo la corriente continua de los pulmones se convierte en una presión de aire oscilante o alterna y la variación de presión en la boquilla obliga a los labios a vibrar en una resonancia del tubo.

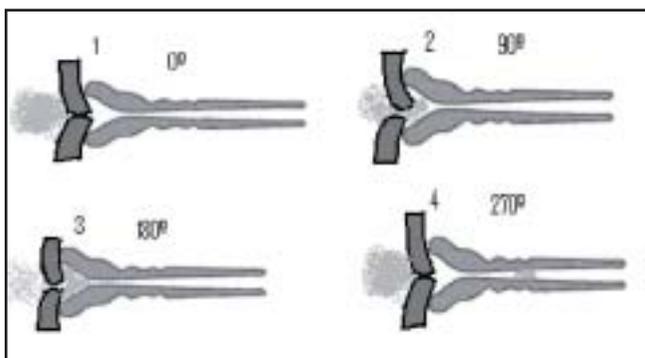


Fig. 2 Ciclo de vibración de un generador labio-boquilla.

### 3.2 Establecimiento del régimen de oscilación

El proceso descrito permite activar la columna de aire dentro del tubo que comenzará a vibrar oscilando en su movimiento longitudinal debido a los soplos periódicos de aire suministrados por la embocadura. Ahora bien, el proceso sonoro dentro del tubo no se habrá consumado óptimamente en tanto en cuanto no se produzca la necesaria colaboración entre los armónicos del tubo y los labios del músico.

Efectivamente, una vez completado el ciclo la columna de aire debe escoger la frecuencia con la que quiere engancharse, que deberá situarse en o cerca de una de sus frecuencias naturales de vibración. Piénsese que la columna gaseosa está vibrando no solo en la frecuencia fundamental sino también en frecuencias que son múltiplos enteros de la fundamental, es decir, en todas sus frecuencias de resonancia simultáneamente. Por su parte, los labios tienen su propia frecuencia natural de vibración, al igual que una lengüeta, determinada y controlada por su masa y su tensión. Sin embargo, las resonancias del tubo – especialmente en las frecuencias bajas – se ajustan más a la frecuencia y son más fuertes que las de los labios, lo que les permite

tomar el control del diapasón con la ayuda del instrumentista. Así, el músico puede ajustar el diapasón de una nota modificando la tensión del labio, aunque la frecuencia del armónico no se altera<sup>14</sup>.

No es indiferente en el éxito del proceso sonoro la forma del ataque o primera fase del sonido. Cuando el instrumentista ha vibrado sus labios para escoger la nota deseada, la columna de aire comienza la colaboración en el régimen de oscilación. Sin embargo, se necesitan varios viajes de la onda antes de que el régimen se establezca completamente y, en ocasiones, antes de que esto suceda la onda puede encontrar en su viaje ciertos accidentes que pueden devolver la onda de presión a la boquilla antes de cumplir su ciclo<sup>15</sup>. Este problema, aunque no insoluble, no es cuestión baladí, ya que, en este supuesto, la cadena del proceso puede verse interrumpida, a saber: perturbación-movimiento armónico-onda armónica-reflexión-interferencias-onda estacionaria-enganche de una frecuencia de resonancia del tubo con una frecuencia de vibración del labio-resonancia. De hecho, esto puede abortar el feliz acontecimiento sonoro. Este imponderable puede sobrevenir, en ocasiones, por una inapropiada boquilla, por cualquier discontinuidad aguda en la sección cruzada del tubo o, simplemente, por un ataque inadecuado del instrumentista.

Así, en el caso de que no se complete el proceso por esta u otra razón, podrá sobrevenir la emisión de un sonido romo, que no es ni más ni menos que la emisión de una frecuencia natural de la boquilla, en cooperación con los labios del músico, pero sin respuesta resonante del tubo<sup>16</sup>.

### 3.3 Dispositivos de obtención de las notas: válvulas y varas

Los armónicos en los aerófonos se obtienen modificando la longitud eficaz del tubo. Para ello se recurre a dos procedimientos básicos: alterar la longitud de la columna aérea que está operando o hacer uso de uno de los armónicos superiores como notas independientes.

El primer método se lleva a cabo modificando la columna vibrante con segmentos adicionales de tubo, bien sea prolongando la longitud acústica mediante varas, como el caso del trombón, bien añadiendo gracias al empleo de válvulas rotatorias o de pistones. El uso de estos dispositivos debe cubrir el intervalo de quinta entre el segundo y tercer armónico, esto es, seis semitonos, para lo que se requiere seis longitudes adicionales de tubo. De ahí, que tres válvulas sean suficientes para este propósito. De esta forma, se disponen de los regímenes de oscilación donde están presentes todos los armónicos, salvo el fundamental.

<sup>14</sup> WOLFE, Joe: *Brass instruments introduction acoustic*. <www.phys.unsw.edu.au/music/>

<sup>15</sup> BENADE, Arthur H.: *Fundamentals of Musical Acoustics*. New York: Dover Publications, Inc., 1990, p. 425.

<sup>16</sup> El mismo sonido que emitiría la boquilla si no estuviese acoplada al tubo.

Este mecanismo funciona desviando la onda sonora por un segmento suplementario de tubo cuando son accionados, ampliando la longitud de la columna de aire y bajando así el diapasón. De esta forma, cuando una válvula está en su posición alta el aire se dirige directamente por el tubo, pero cuando se pulsa se agrega un segmento adicional de tubo que abre una vía nueva de aire.

Por ejemplo, las tres válvulas de la trompeta agregan seis longitudes de tubo al instrumento para bajar el diapasón. Para bajar el diapasón un semitono se requiere dividir la frecuencia por un factor  $1'05946$ , es decir,  $L \times 1,05946$ <sup>17</sup>. Para satisfacer esta condición se necesita un incremento en la longitud del tubo de aproximadamente un 6%: la segunda válvula, manejada por el dedo medio, baja un semitono al tercer armónico, esto es, del Sol<sub>3</sub> al Fa#<sub>3</sub><sup>18</sup>. Para ello se requiere añadir 8'8 cm a una longitud aproximada de tubo de 148 cm, esto es, un 6% de la longitud total del tubo. Por lo tanto, para bajar un semitono es necesario un tubo de 156'8 cm; la primera segunda válvula, accionada por el dedo índice, está diseñada para bajar un semitono al Fa#<sub>3</sub>, agregando un 6% de una longitud de tubo de 156'8, es decir, un segmento de 9'3 cm que sumado al segmento anterior de 8'8 cm nos da una longitud de 18'2 cm. Así, para un tono se necesita un tubo de 166'2 cm. La tercera, pulsada por el dedo anular, baja una tercera menor, cuya longitud adicional de tubo se obtiene aplicando la misma operación para bajar un semitono. Las combinaciones de las tres válvulas completan el intervalo de quinta: la segunda y la tercera pulsadas simultáneamente bajan cuatro semitonos; la primera y la tercera, cinco semitonos; y las tres válvulas seis semitonos.

No obstante, surgen ciertas discrepancias cuando se utilizan de forma combinada las válvulas. Efectivamente, si se utiliza la primera y segunda válvula sincrónicamente, el incremento añadido de tubo debería corresponder a un 6% de 166'2 cm —la longitud de tubo necesaria para bajar un tono, esto es, 9'9 cm. Sin embargo, la segunda válvula agrega sólo 8'8 cm, de manera que la combinación de estas dos válvulas añade 1'1 cm menos de la cantidad requerida para bajar el diapasón una tercera menor. Las mismas discrepancias surgirán cuando la tercera válvula se usa en combinación con otras. Por ejemplo, pulsando las tres válvulas simultáneamente se obtiene el Fa#<sub>2</sub> con una longitud de tubo 3 cm más corta de lo que se requiere, lo que da un sonido más agudo de su valor nominal.

El trombón, con una longitud de tubo de 270 cm, obtiene su escala disponiendo de una longitud telescópica continuamente variable mediante el uso de una vara<sup>19</sup>. Este mecanismo es posible gracias a un diseño con una sección esencial-

mente cilíndrica. En su primera posición, el tubo presenta la longitud más corta que produce la fundamental más aguda y su correspondiente serie armónica. Deslizando la vara a modo de telescopio se obtienen los semitonos en siete posiciones. La última posición utiliza la mayor longitud de tubo, pero en teoría esta fundamental no puede emitirse en un tubo tan estrecho y tan largo. Sin embargo, sí pueden tocarse los armónicos superiores.

En cuanto a la trompa y la tuba, se suele utilizar las válvulas rotatorias, cuyo funcionamiento es análogo a la de pistones. La trompa es prolífica en armónicos, lo que constituye un de sus características que singulariza su especial timbre. Puede producir entre dieciséis y veinte armónicos, una cantidad sustancial comparada con los nueve o diez que puede emitir la trompeta o el trombón. El diseño de su boquilla con una copa más profunda y una constricción en el canal interior más gradual contribuyen a ajustar las resonancias para que su emisión sea más fácil.

Otra característica acústica de este instrumento la constituye la técnica conocida como *sonidos tapados*. Esta técnica se consigue introduciendo la mano del músico en el pabellón del instrumento, lo que aumenta la masa acústica de la columna de aire y baja las resonancias. Esta acción, amén de contribuir al ajuste de la afinación, modifica el timbre dado que reduce la radiación de la campana de las ondas de frecuencia alta y, por consiguiente, aumenta la reflexión de estas ondas, lo que refuerza sus ondas estacionarias e incrementa la emisión de las resonancias más agudas.

La evolución de la tuba es producto de la necesidad de llenar una tesitura amplia en estos instrumentos. Su gran tubo cónico y la adición de una cuarta válvula para minimizar las desviaciones de frecuencia producidas por el empleo de tres válvulas constituyen sus particularidades acústicas.

Por lo que concierne al segundo método de obtención de notas, más impreciso en lo que a afinación se refiere por las particularidades de las series armónicas y de las vibraciones de los tubos, consiste en inhibir el sonido o sonidos más graves obligando así a que suene el armónico deseado como nota independiente y se perciba como la altura de la nota. Teniendo en cuenta que el armónico más grave es el que dicta el diapasón y que todos los armónicos superiores participan de la vibración, si se incrementa la presión de soplo la frecuencia de vibración del labio, al moverse más rápidamente, se elevará. De esta forma se producirá el enganche de la nueva frecuencia de vibración del labio con una armónico del tubo de frecuencia más aguda, inhabilitando los graves que

<sup>17</sup> Este es el valor del semitono temperado. El sistema temperado consiste en dividir la octava en doce partes alicuotas que corresponden cada una a un semitono. Para obtener el valor del semitono temperado se establece una progresión geométrica cuyo primer término es 1 y cuyo último es 2, esto es, la octava. Pues bien, la razón de la progresión la constituirá un número que multiplicado doce veces por sí mismo nos lleve a 2:

$$\text{Semitono}^{12} = \text{octava} \quad \text{Smt}^{12} = 2 \quad \text{Smt} = \sqrt[12]{2} = 1'05946$$

<sup>18</sup> Según el índice acústico-musical franco-belga.

<sup>19</sup> Este mecanismo se desarrolla entre los siglos XV y XVI, originariamente en un antepasado del actual trombón que se conoce con el nombre de sacabuche, término francés que proviene de los verbos *saquer*, que significa tirar, y *bouter*, presionar.



# Vibcon

Vibroacústica, control y aislamiento, S.L.



## Buenas Vibraciones

VIBCON diseña, proyecta, fabrica...  
para usted

### Mediciones vibroacústicas

Mediciones de vibraciones y ruido.  
Mediciones "in situ" del aislamiento al ruido  
aéreo entre locales y fachadas.



### Solución de problemas

Aislamiento de vibraciones de maquinaria  
e instalaciones en edificios.  
Cálculo y selección de montaje antivibratorio.



### Fabricación propia

Fabricación y suministro de antivibraciones  
y materiales para aislamiento de ruido estructural.  
Bancadas flotantes.



Abat Marcet, 41-43  
08173 Sant Cugat del Vallès (Barcelona)  
Tel. 902 19 55 12 Fax. 93 675 58 90  
vibcon@vibcon.net  
www.vibcon.net

ahora se sitúan lejos de la frecuencia de vibración del labio y, por tanto, no pueden participar del régimen de oscilación.

#### 4. Diseño y calidad tonal

El principio básico en el diseño de los instrumentos de viento es que sus tonos se ajusten a la serie armónica. De esta forma, cuando se está tocando un sonido fundamental los parciales superiores también están presentes en la vibración, de manera que refuerzan el tono creando un sonido fuerte, estable y rico. En ausencia de esta cooperación entre el fundamental y sus armónicos, el tono emitido será inestable. Ahora bien, la condición para que estos armónicos colaboren es que sigan la serie armónica. Si un armónico se desmarca del grupo y por lo tanto se desvía del modelo armónico, las consecuencias para la calidad tonal son nefastas ya que este armónico contaminará y perjudicará la sinergia del sistema. En estas condiciones, la colaboración se resiente y el resultado deviene en un timbre enfermo y, lo que es más importante, cuando el músico toque ese armónico como nota independiente, su afinación siempre estará desajustada.

##### 4.1 Diseño de la boquilla

El diseño de la boquilla tiene una gran importancia en el funcionamiento del sistema acústico dado que determina en gran medida la calidad del sonido. Por ello, su elección por parte del instrumentista resulta primordial para poder ajustar la agilidad de la ejecución y sus particularidades físicas. La mayoría de las disfunciones acústicas -afinación precaria, fallos en el ataque, falta de agilidad en ciertos registros, etc.- están relacionadas con la forma de la boquilla. Estos problemas tienen su origen generalmente en la resistencia que plantea la boquilla a la presión insuflada por el músico. Las modificaciones en este elemento permiten al músico equilibrar esta resistencia y, por ende, optimizar el funcionamiento del instrumento.

Asimismo, la forma de la boquilla constituye un segmento de tubo que introduce desviaciones de la forma ideal cónica o cilíndrica. Efectivamente, en los instrumentos de metal cónicos, donde los lados del cono deberían encontrarse, se ubica la boquilla. Este elemento debe reducir al mínimo los efectos sobre la calidad del tono y para ello debe considerarse una equivalencia entre el volumen que puede albergar y el volumen total de aire que tendría el segmento de corte del cono. De esta forma, si la boquilla incluye el mismo volumen de aire que la parte de corte del cono, las frecuencias bajas quedan prácticamente inalteradas ya que sus longitudes de onda son largas comparadas con el tamaño de la boquilla. Sin embargo, en las frecuencias altas la boquilla funciona como un resonador, y por tanto presenta una fre-

cuencia natural de resonancia. Por encima de su frecuencia natural, la boquilla suma una longitud adicional a la longitud del tubo. *El resultado total es que la boquilla prolonga el tubo en una cantidad que aumenta con la frecuencia creciente*<sup>20</sup>.

##### 4.2 Diseño de la sección acampanada: radiador vs reflector

Otra cuestión complicada en el diseño de estos instrumentos tubulares es la forma de la campana y la abertura exponencial. El diseño de esta sección abocinada debe contemplar dos cuestiones: por un lado, cubrir las necesidades que se plantean por el uso de un tubo cilíndrico en la mayor parte de su sección cruzada, esto es, ajustar las resonancias armónicas impares a la serie armónica; por otro, aumentar la radiación del instrumento, que en un tubo cilíndrico sería menor. De esta forma, se consigue incrementar la intensidad sonora.

La región del pabellón donde el aire interno entra en contacto con el externo constituye un punto crítico para la producción sonora del instrumento. En este sentido, hay que considerar que la abertura del pabellón debe reflejar y radiar una banda de frecuencias amplia que abarca casi cuatro octavas. Si tenemos en cuenta que el efecto de reflexión y radiación depende de la relación entre la longitud de onda del sonido incidente y el diámetro de la abertura, se comprende que el efecto será diverso en función de la frecuencia. Así, para una sección acampanada con un radio de curvatura dado, las ondas más largas -los sonidos graves- se reflejan antes que las ondas cortas, dado que sus longitudes de onda son muchísimo más largas que el radio de curvatura de la campana. Sin embargo, en las frecuencias altas, cuando la longitud de onda se hace comparable con la circunferencia de la campana, el sonido comienza a irradiarse al aire circundante en lugar de reflejarse. Podría decirse que esta región funciona como un filtro o absorbente que atrapa las frecuencias altas. Una vez han traspasado esta barrera crítica debido a su mayor inercia ya no hay retorno y el sonido se escapa al aire externo. Ya que han sido expulsadas del tubo, la energía sonora que transportan no llega a la onda estacionaria y por tanto estas ondas no pueden resonar en el tubo y participar del proceso sonoro.

Por consiguiente, a diferencia de las frecuencias altas donde no existe tanta diferencia, las resonancias más graves en un cono con una abertura exponencial tienen frecuencias ligeramente más altas que las de un cilindro con análoga longitud, dado que en éste las ondas llegan hasta el final del tubo antes de ser reflejadas.

En definitiva, esta función de radiación comporta otro efecto, y es que cuanto más sonido se irradia menos sonido

---

<sup>20</sup> BACKUS, John: *The Acoustical Foundations of Music*. New York: Norton, 1977, págs. 263-64.

queda reflejado. Así, para una apertura grande, la radiación sonora será mayor, ya que habrá una mayor superficie radiante. Por el contrario, para una pequeña apertura el sonido que se radiará será menor y, por consiguiente, la onda estacionaria será más fuerte. Por tanto, si aumentamos el diámetro de la apertura aumentamos la eficacia de radiación del instrumento, pero debilitamos la onda estacionaria —ya que esta depende de la reflexión—, con los efectos que ello acarrea en la calidad tonal del instrumento, de lo que se deduce que la presencia de una campana afecta a la afinación e intensidad relativa de los tonos.

### 4.3 El ajuste de las resonancias armónicas

El lector curioso ávido de información se habrá preguntado a estas alturas del artículo qué pasa con los armónicos pares, teniendo en cuenta que el trombón o la trompeta utilizan un tubo esencialmente cilíndrico, cerrado por la boca del instrumentista, y los armónicos inherentes a estos tubos son los impares<sup>21</sup>. Buena pregunta. Efectivamente estos instrumentos se diseñan con un tubo cilíndrico cerrado, pero también llevan adosado una boquilla y una sección exponencial que se abre hacia el pabellón. Estas modificaciones en la sección cruzada modifican las frecuencias de resonancia del tubo cilíndrico y las aproximan a una serie armónica completa, 2:3:4:5 etc., salvo el fundamental, la resonancia más baja que no es miembro de la serie y que, por tanto, queda inhabilitada.

Los tubos cónicos tienen las frecuencias de resonancias más elevadas y más espaciadas que las de un tubo cilíndrico cerrado, de manera que si introducimos en un tubo cilíndrico una sección cónica se induce a las frecuencias de resonancia a elevarse. Ahora bien, la subida no es uniforme en toda la gama. Las frecuencias más graves se suben ligeramente debido a que estas frecuencias se reflejan antes en un tubo cónico que en uno cilíndrico, pero para las agudas esta ampliación no afecta demasiado a su diapasón. Además, las resonancias superiores se suben proporcionalmente menos por el efecto resonador de la boquilla. De esta forma, el resultado se aproxima a una serie armónica, aunque la resonancia más baja es desechada y un *tono pedal* suplementario puede ser tocado con cierta dificultad como la fundamental de la serie.

El tono pedal es, por tanto, una nota que está en la frecuencia fundamental de la serie armónica del instrumento, pero no es una resonancia de la columna de aire, lo que constituye una característica única en los instrumentos de metal. Sin embargo, si los labios del músico vibran en la frecuencia del tono pedal, todos los armónicos superiores contribuyen y producen un tono en este diapasón. Posponemos el proceso de obtención de este tono ficticio para el siguiente apartado.

### 4.4 Desviaciones del modelo geométrico ideal

Para llevar a cabo el estudio y diseño de los instrumentos tubulares 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. Efectivamente, las paredes del tubo no son perfectamente rígidas, ni completamente cilíndricas. Por otro lado, la velocidad de la onda no es constante y, para complicar más la situación, suele haber disipación de energía en el curso de la propagación por los intercambios de calor entre el gas y las paredes. Además, los tubos sonoros utilizados en los instrumentos musicales no son inherentemente armónicos, para tal caso deberían presentar un diseño perfecto. Por tanto, despreciando estos factores, se considera un sistema ideal, lo que introduce inevitablemente desviaciones que deben corregirse con alteraciones en la forma del tubo.

Asimismo, en el diseño de estos instrumentos debe considerarse un principio básico que los limita acústicamente, a saber: si el tubo se diseña más amplio en lo que concierne a su longitud, los tonos de pedal suenan más fácilmente pero las resonancias superiores serán más difíciles de emitir. Y al contrario, si se estrecha, los armónicos más altos se obtendrán con comodidad, mientras la emisión de la frecuencia fundamental será virtualmente imposible de emitir, y la escala comenzará con la mitad de la vibración de su longitud, es decir, con el segundo armónico.

Una de las consecuencias musicales derivada de las alteraciones introducidas en el tubo para ajustar las resonancias armónicas son las desviaciones de frecuencia producidas por la adición de un segmento de tubo en el centro de un cono. Esta alteración en el tubo reduce el parámetro medio de apertura. Eso significa que la adición de una válvula en un cono tiene un efecto mayor en las frecuencias de sus modos inferiores que en los más altos. En este sentido, los fabricantes de instrumentos de metal no han considerado los efectos producidos por las alteraciones introducidas en el tubo por la apertura de la sección del extremo abierto o por la boquilla para calcular la longitud de la válvula en un tubo cilíndrico cerrado<sup>22</sup>. La regla básica descrita a propósito del funcionamiento de las válvulas es válida para obtener los tonos entre el tercer y el segundo armónico, pero cuando estos tubos suplementarios se utilizan en combinaciones diferentes para proporcionar otros tonos de la escala, son inevitables determinadas discrepancias en la afinación que, sin embargo, pueden ser corregidas por la embocadura del músico<sup>23</sup>.

<sup>21</sup> En los cilindros abiertos y los conos la onda sonora se propaga dos veces en el interior del tubo como consecuencia de la reflexión en el extremo abierto, mientras que en el cilindro cerrado la onda recorre cuatro veces el tubo. La onda estacionaria del primer armónico se forma en los primeros con un nodo de presión en cada extremo del tubo y un vientre en el centro —es decir, de forma simétrica—, mientras que en el cilindro cerrado el diseño de la onda estacionaria ofrece un nodo de presión en el extremo abierto y un vientre de presión en el cerrado —la boquilla del instrumento—. Así, en un tubo cilíndrico cerrado las resonancias solo se obtienen con los números impares de la serie -100 Hz, 300 Hz, 500 Hz, etc.- debido a que su vibración fundamental solo puede subdividirse en mitades impares.

<sup>22</sup> BACKUS, John: *Ibidem*, pág. 412.

<sup>23</sup> El músico de metal puede variar la afinación de su instrumento en torno a un tercio de semitono.

Efectivamente, tal y como ha quedado demostrado en el anterior apartado, si consideramos el tubo de una trompeta con una longitud aproximada de 148 cm, el incremento de tubo que añade la primera y la segunda válvula accionadas simultáneamente no es equivalente con una tercera menor, sino que el sonido que se obtiene es más agudo. De esta forma, es necesario buscar un compromiso, ya que si las válvulas se calibran para bajar 1, 2 y 3 semitonos, sus combinaciones para bajar 4, 5 y 6 semitonos producirán notas demasiado agudas.

Las varas tampoco están exentas de ciertas limitaciones acústicas inherentes a la geometría de su tubo. Efectivamente, lo máximo que puede prolongar la longitud una vara es algo menos que el doble de la longitud total, lo que quiere decir que el cambio máximo posible de diapasón es menos de una octava. No obstante, esto es suficiente para los trombones, dado que estos instrumentos sobresoplan al quinto armónico. Para obtener la escala ascendente, después de tocar toda la gama de sonidos disponible por la vara en el primer registro, el trombonista puede seguir ascendiendo saltando una quinta por encima.

Por otro lado, en el estudio y diseño de estos instrumentos debe considerarse la no linealidad que el sistema ofrece. En efecto, en estos instrumentos no existe una proporcionalidad entre el estímulo y su respuesta, de manera que los labios del instrumentista no se mueven de forma sinusoidal cuando se abren y cierran, sino que responden de manera no sinusoidal, lo que provoca una distorsión acústica. No obstante, esta propiedad de no linealidad solo se da en niveles sonoros altos. Esta característica, conocida con el nombre de *no linealización*, implica que la respuesta neta del sistema a varios estímulos no es la suma de las respuestas medidas individualmente. Por consiguiente, en un sistema *no lineal* la respuesta entera no es simplemente la suma de sus partes<sup>24</sup>.

Pongamos un ejemplo práctico. Si un instrumentista de viento-metal toca *piano* en una frecuencia alta, sus labios casi no se mueven, de manera que no disponen del suficiente tiempo para cerrarse completamente. En este caso se observa una vibración casi sinusoidal (fig. 3A), lo que significa que en el espectro solo figuran dos o tres resonancias y que los armónicos más altos son débiles o inexistentes y, por tanto, no contribuyen a colorear el timbre. Si el músico aumenta la intensidad de sople, los labios se cierran bruscamente, lo que da lugar a un comportamiento no lineal que genera los armónicos más altos y, por consiguiente, un timbre más rico y brillante (fig. 3B)<sup>25</sup>.

En términos musicales, esta característica de los sistemas no lineales conlleva que, en ocasiones, los componentes superiores armónicos presentes en el flujo no contribuyan nada para mantener el régimen de oscilación. No obstante, este fenómeno tam-

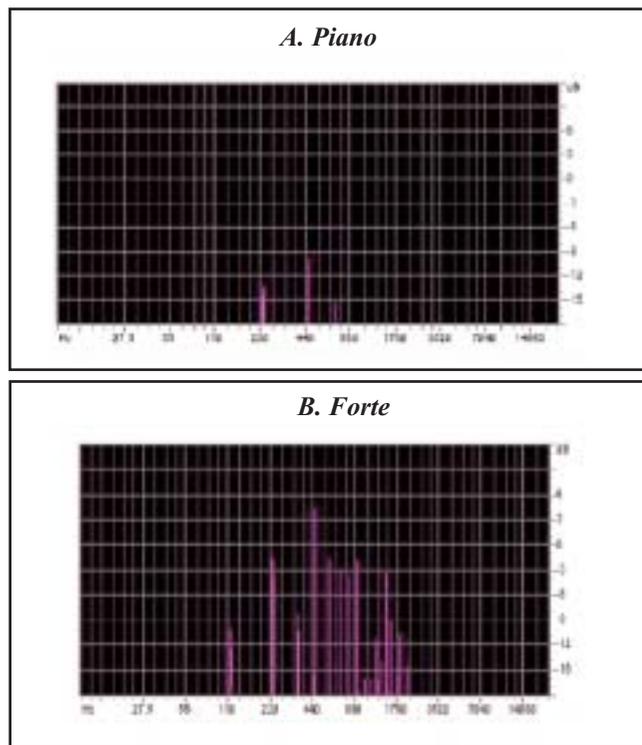


Fig. 3 Espectros externos de un Sib2 emitido con diferentes dinámicas (Trombón).

bién tiene una contribución positiva en la calidad del tono que tiene que ver con la producción de *componentes heterodinos o resultantes* necesarios para obtener ciertas frecuencias ausentes en la vibración y para colorear el timbre. Estos sonidos, también denominados *armónicos artificiales*, sobrevienen cuando dos resonancias agudas se combinan y contribuyen a establecer una vibración no lineal en los labios. En estas condiciones, se producen frecuencias inexistentes en la vibración mediante la diferencia y la suma, es decir, componentes de vibración con una gama de frecuencias que incluye  $f_1 + f_2$ , que corresponden a los llamados *adicionales*, y  $f_1 - f_2$  que se conocen como *diferenciales*<sup>26</sup>.

Por ejemplo, si escuchamos un sonido compuesto por dos parciales de frecuencia 200 y 300 Hz, para el componente heterodino de 300 Hz se obtiene el armónico diferencial:  $300 - 200 = 100$  Hz. Así, si la boquilla y la campana suben y ajustan las frecuencias resonantes impares del tubo a los números pares, por ejemplo, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 Hz, etc., se obtendría el tono pedal de 100 Hz, aunque no pertenezca realmente a esa serie. En estas condiciones, nuestro sistema auditivo reconocerá las relaciones de frecuencia en esta secuencia de componentes y los percibirá como un conjunto sonoro, cuya fundamental se sitúa a 100 Hz, independientemente de las amplitudes de sus componentes y de la forma en la que lleguen al oído<sup>27</sup>.

<sup>24</sup> BENADE, A.H.: *Ibidem*. 262 p.

<sup>25</sup> WOLFE, Joe: *Ibidem*.

<sup>26</sup> Los componentes adicionales fueron descubiertos por Helmholtz y los diferenciales por el organista Sorge y el violinista Tartini. Dependen de las amplitudes de las señales o fuerzas de excitación y la boquilla de estos instrumentos genera excitaciones más fuertes y más no lineales que los de lengüeta, aunque en estos también es posible obtenerlos con digitaciones especiales.

<sup>27</sup> BENADE, Arthur H.: *Ibidem*, págs. 254-64.

La explicación científica de este fenómeno tiene dos vertientes. Por un lado se atribuye a la no linealidad que presenta la membrana basilar en la transmisión del sonido, aunque estudios recientes han demostrado que estos sonidos persisten aun cuando la intensidad de los sonidos es baja, y por consiguiente, la respuesta es casi lineal. Por otro, se piensa que la sensación de estos sonidos artificiales se debe a un proceso neurológico que se genera en nuestro sistema nervioso y que, por tanto, lo genera nuestro cerebro. En este sentido, se ha demostrado que si se suprime con un filtro el componente fundamental de un sonido complejo previamente grabado, y se escucha posteriormente, este armónico persiste. En este caso, nuestro inescrutable cerebro ha completado la información que falta en el estímulo auditivo.

#### 4.5 El timbre

Los sonidos musicales constituyen una compleja mezcla de vibraciones que pueden ser analizadas mediante el denominado *espectro acústico*. El estudio del timbre de los instrumentos musicales se lleva a cabo científicamente mediante la obtención del espectro, entendido como una representación gráfica de un sonido cuantificando cada una de sus vibraciones como una función de frecuencia. En esencia, la estructura del espectro incluye el número, magnitud y espaciado de las líneas espectrales que corresponden a los armónicos que están resonando dentro del tubo.

El timbre de los metales se caracteriza por una gran riqueza armónica que lo singulariza con respecto a las maderas. Su largo tubo adosado a un generador no lineal en un extremo y a una sección acampanada en otro, explican su rico color. No obstante, para caracterizar el timbre de estos instrumentos hay que considerar algunas cuestiones. En primer lugar, no es igual el espectro de un sonido medido dentro del instrumento, que el obtenido en el exterior, donde entran en juego múltiples factores: características de radiación, direccionalidad, existencia de reverberación, etc. En la figura 4 se muestran los espectros externos e internos de un mismo sonido en la trompa y en el trombón. El espectro externo se ha medido con un micrófono direccional situado a un metro aproximado del radiador del instrumento, mientras que el interno se obtiene con un micrófono situado en el interior del tubo. Ambas muestras han sido emitidas en una dinámica de *mezzoforte* y en un ambiente anecoico. Aunque el espectro del sonido medido dentro del instrumento muestre una atenuación por encima de una frecuencia determinada, el sonido que se radia fuera del tubo no se comporta igual debido a que las frecuencias más altas son irradiadas de forma más eficiente por la campana.

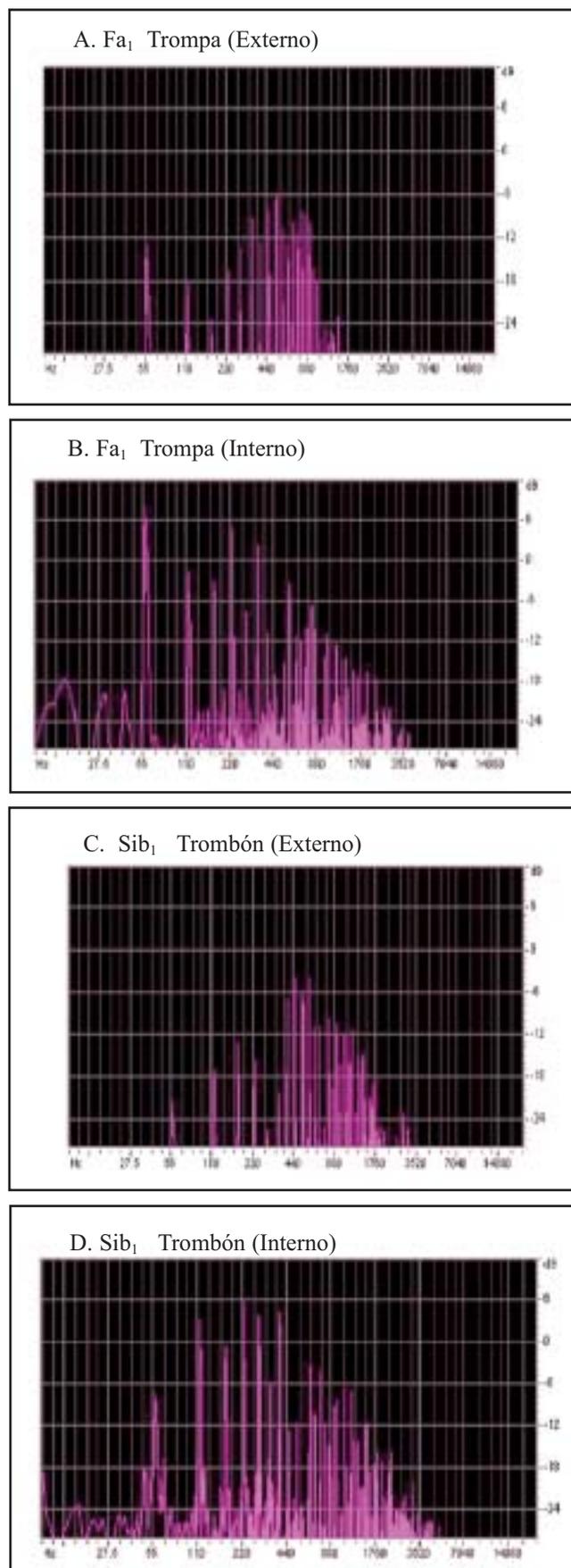


Fig. 4 Espectro externo e interno de un sonido de la trompa y otro del trombón.

Si comparamos el espectro externo con el interno en la figura 4, lo que más llama la atención es que la intensidad de los parciales crece por encima de la fundamental (fig. 4A y 4C) debido a la radiación de la campana, a diferencia del interno donde este armónico suele tener más intensidad (fig. 4B y 4D). Aunque todos los armónicos se debilitan como consecuencia de las pérdidas inherentes a la propagación sonora, la energía irradiada aumenta con la frecuencia, es decir, los picos más altos corresponden a los armónicos de frecuencia más alta, lo que demuestra que estos instrumentos consiguen la radiación máxima en los sonidos más agudos. Además, recuérdese que la boquilla funciona como un resonador intensificando las frecuencias que se sitúan cerca de su frecuencia natural, lo que contribuye también a reforzar estos picos.

Por consiguiente, la razón por la que estos instrumentos pueden enmascarar a otros no es porque el músico de metal sople con más intensidad, sino por su especial diseño y sus características de radiación, a saber: el efecto de la boquilla<sup>28</sup>, el área de la campana, las características direccionales y el hecho de que la campana irradia eficazmente frecuencias en una banda donde nuestros oídos son más sensibles -entre los 1000 y 3000 Hz-.

En relación con las características direccionales, la intensidad del sonido irradiado en los instrumentos musicales varía con la dirección de observación en lo que concierne a un eje de referencia del sistema. En general, el patrón de radiación varía con la frecuencia emitida debido al fenómeno de la difracción. En frecuencias con largas longitudes de ondas la radiación se produce isotrópicamente en la abertura, que actúa como un centro emisor de ondas en todo su perímetro. Por el contrario, en frecuencias altas, con longitudes de onda cortas, la radiación se concentra en una sola dirección. Por consiguiente, este comportamiento acústico contribuye a que la radiación de sonidos agudos sea bastante direccional. Si tenemos en cuenta, por otra parte, que el radiador de la trompeta y el trombón se dirige hacia el público del auditorio, se entiende el sonido tan incisivo y potente de estos instrumentos, en especial en los sonidos agudos con una gama de frecuencias donde nuestros oídos son más sensibles. El diseño de la trompa y la tuba, sin embargo, dirige su pabellón en otra dirección, de forma que el sonido no llega al público directamente, sino que parte de la energía -fundamentalmente frecuencias altas- se pierde en absorciones en las paredes u otros materiales.

Una forma de modificar el timbre de un instrumento de metal consiste en alterar el funcionamiento de la campana con una *sordina*, reduciendo así la eficacia de radiación para la mayor parte de las frecuencias. Este elemento, que se sujeta al instrumento con unos corchos dejando un espacio libre, funciona como un filtro que deja pasar preferentemente

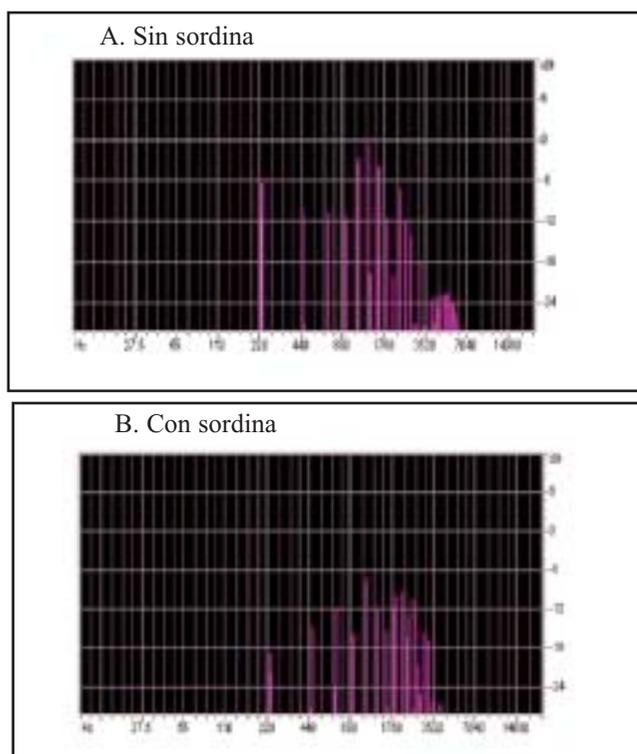


Fig. 5 Espectro externo de un Do3 de una trompeta

una banda determinada de frecuencias. Básicamente reduce más la radiación de las frecuencias bajas en relación con las altas. Este efecto puede observarse en los espectros de la figura 5, que corresponden a un Do<sub>3</sub> de una trompeta tocado con y sin sordina. En el espectro del sonido con sordina se aprecia una atenuación de la intensidad de algunas resonancias -especialmente las graves-, lo que oscurece el timbre.

## 5. Conclusiones y consideraciones finales

Si exceptuamos los instrumentos de percusión, el sistema acústico de los metales es el más simple de todas las familias orquestales y, sin embargo, es prolífico en armónicos, lo que constituye la particular excelencia que caracteriza a estos instrumentos. Aunque su diseño característico merma su agilidad técnica, lo convierte en un instrumento potente y necesario para completar la paleta de colores orquestal.

Por otro lado, el ajuste de las resonancias armónicas en estos instrumentos deviene especialmente compleja teniendo en cuenta, por un lado, la geometría de su tubo, y por otro, el uso de válvulas para obtener la escala. Estos dos factores dificultan sobremedida el modelado del instrumento, dado que contaminan las cooperaciones entre las frecuencias de resonancia, esto es, la base de un tono musical. Así, se puede decir que es en estos aerófonos donde el establecimiento del régimen de oscilación, esto es, la emisión de un tono con una óptima calidad, se torna más complicado e incierto.

<sup>28</sup> La boquilla de los metales incrementa el doble la presión sonora en relación con una boquilla de lengüeta, lo que equivale a seis decibelios, un valor que también influye en la intensidad sonora.

En el último siglo, la investigación científica sistemática de los instrumentos musicales ha permitido avances notables en el estudio y diseño de estos instrumentos. Aunque parece que se ha tocado techo en el diseño de estos instrumentos, en las últimas décadas ha existido una necesidad perentoria de precisar con exactitud las frecuencias del modelo geométrico ideal. En este sentido, el uso de la impedancia de entrada en el instrumento ha supuesto un gran avance para el estudio y optimización de la calidad tonal de los aerófonos, dado que permite observar y, por tanto, predecir los armónicos que el instrumento podrá tocar de forma afinada, algo impensable en épocas pasadas. Cualquier desviación de las relaciones armónicas estrictas puede corregirse relativamente introduciendo alteraciones en el tubo, bien en el taladro, bien en las longitudes de las válvulas. Aunque, en la práctica, cualquier alteración en el sistema desequilibra la balanza cromática, o si se quiere, introduce cierta inarmonicidad en la calidad tonal. Piénsese que estas modificaciones no afectan por igual a todos sus modos resonantes, lo que se puede verificar cuando se altera la forma de la campana o de la boquilla.

En consecuencia, aunque el reto de los fabricantes se dirige a ajustar las resonancias o armónicos del tubo a la serie armónica, lo que se consigue parcialmente, por el momento en el diseño de estos instrumentos, al igual que sucede con el clarinete por su especial funcionamiento acústico de tubo cerrado, debe buscarse un compromiso que satisfaga las necesidades del músico, ya que son inevitables ligeras discrepancias. El resto queda en manos del instrumentista que para eso ha sido entrenado.

## 6. Bibliografía

BACKUS, John: *Input Impedance Curves for the Brass Instruments*. JASA, 60, 1976.

BACKUS, J. y HUNDLEY, T. C.: *Harmonic Generation in the Trumpet*, JASA, 13, 1971.

BACKUS, John: *The Acoustical Foundations of Music*. New York: Norton, 1977.

BAINES, Anthony: *Brass Instruments*. New York: Dover Publications, Inc., 1993.

BATE, Philip: *The Trumpet and Trombone*. London: Ernest Benn Limited, 1978.

BENADE, Arthur H.: *The Physics of Brasses*, *Scientific American* 229, 1973.

BENADE, Arthur H.: *Fundamentals of Musical Acoustics*. New York: Dover Publications, Inc., 1990.

BOUASSE, Henri.: *Instruments à Vent*. Paris, Librairie Delagrave, 1929.

CAMPBELL, Murray y GREATED, Clive: *The Musician's Guide to Acoustics*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

DONINGTON, Robert: *La música y sus instrumentos*. Madrid: Alianza Editorial, edición castellana, 1986.

FLETCHER Neville H. y ROSSING, Thomas D.: *The Physics of Musical Instruments*. New York: Springer-Verlag, 1998.

HELMHOLTZ, H.: *On the Sensations of Tone*. New York, Dover, 1954.

HERBERT, Trevor y WALLACE, John: *Brass Instruments*. Cambridge University Press. Cambridge, 1997.

HERDIN, Burton: *Brass Embouchure*. The Instrumentalist Company. Northfield, Illionis, 1975.

IGARASHI J. and KOYASU, M.: *Acoustical Properties of Trumpets*, JASA, 25, 1953.

HOPKIN, Bart: *Musical Instruments Design*. Tucson: See Sharp Press, 1996.

MARTIN, D. W.: *Directivity and Acoustic Spectra of Brass Wind Instruments*, JASA, 13, 1942.

MORSE, P.M.: *Vibration and sound*. New York, MacGraw-Hill, Segunda Edición, 1948.

NEDERVEEN, C.J.: *Acoustical Aspects of Woodwind Instruments*. Amsterdam, Frits Knuf, 1969.

OLSON, Harry F.: *Music, Physics and Engineering*. New York: Dover Publications, Inc., 1967.

PASTOR, Vicente: *Los instrumentos de viento-madera y su acústica*, *Revista Música y Educación*, 69, 2007.

RAYLEIGH, John W. S.: *The Theory of Sound*. New York: Dover Publications, Inc., 1945.

ROSSING, Thomas D.: *The Science of sound*. Canada: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.

SCHAEFFER, P.: *Tratado de los objetos musicales*. Madrid, Alianza Música, segunda reimpresión, 2003.

On line:

C.R. NAVE GEORGIA STATE UNIVERSITY: *Hyperphysics*.  
<[www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html](http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html)>

WOLFE, Joe: *Brass instruments introduction acoustic*.  
<[www.phys.unsw.edu.au/music/](http://www.phys.unsw.edu.au/music/)>

# La nueva generación de sonómetros

No es solo una novedad. Es la nueva generación de sonómetros, una nueva presencia en el mundo del ruido ambiental y las vibraciones.

Sin complejidades, está diseñado para hacer la vida más fácil; sin exigencias, trabaja para usted; y además, se adapta a cualquier idioma.

## Hecho a su medida

Con más de 60 años como pioneros dentro del mundo del sonido y la vibración, Brüel & Kjær presenta su 4ª generación innovadora de instrumentos manuales para la medida de vibraciones y sonido.

El desarrollo de esta última generación -centrada en el Tipo 2250 - está inspirado completamente en las exigencias de usuarios que participan en seminarios y reuniones en todo el mundo. El hardware ha sido diseñado para cumplir las exigencias específicas ergonómicas de los usuarios, y el software de aplicación abarca todo sobre ruido ambiental, resolución de problemas, salud laboral y control de calidad.

Los paquetes de programas de software se pueden adquirir de forma separada, por lo que usted conseguirá lo que necesita justo cuando lo necesite y además será más fácil adaptarnos a sus exigencias si éstas cambian. De esta forma, la plataforma le asegura su inversión ahora y en el futuro.

Creado, construido y hecho para usted personalmente, verá como el 2250 marca una gran diferencia en su trabajo y en todas sus tareas de medición.

**¡Consúltenos!**

Para más información, contacte con Brüel & Kjær Ibérica, S.A.

### Sede social:

Teide, 5 28700 San Sebastián de los Reyes (Madrid)  
Tel.: 91 6590820 Fax: 91 6590824

### Delegación:

Valencia, 84-86 interior 08015 Barcelona  
Tel.: 93 2264284 Fax: 932269090

www.bksves.com email: bruelkjaer@bksv.com



**Tipo 2250**

**Brüel & Kjær** 

# PULSE *multi-analizadores*



Las nuevas unidades de adquisición 3560-L y 3560-B se añaden a la **familia PULSE** haciendo posible elegir el modelo exacto que usted necesita.

Desde la medida más sencilla, de un solo canal, hasta las tareas de holografía acústica más complejas en tiempo real multicanal, todas las aplicaciones de acústica y vibraciones están cubiertas con PULSE, un sistema abierto, flexible y 100% compatible con otras aplicaciones.

Con más de 5.000 sistemas vendidos (cifras de abril 2004), PULSE se ha convertido en la plataforma de análisis de ruido y vibraciones de más éxito y mayor crecimiento en el mercado.

**2260 Observer** es un sonómetro y analizador portátil capaz de realizar todas las medidas y análisis que normalmente se utilizan en la evaluación de ruido en comunidades y entornos de trabajo. 2260 Observer cumple la nueva norma sobre sonómetros IEC 61672, así como las normas IEC anteriores (60651 y 60804) y las normas ANSI más recientes, además de tener la aprobación de modelo.

Todos los parámetros de banda ancha y valores estadísticos se miden en paralelo, de forma que no se pierde ningún detalle: todos los parámetros están ahí, y sólo hay que elegir qué es lo que se desea examinar, ahora o más tarde.

Tipo 2260

## 2260 *investigator*

Brüel & Kjær 

Grupo

**AUDIOTEC**



Ingeniería y Control del Ruido



## NUEVO CENTRO DE ACÚSTICA EN ESPAÑA

- ENSAYO DE MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN CÁMARAS ACÚSTICAS NORMALIZADAS
  - Ensayos de aislamiento acústico de cerramientos verticales (tabiques, trasdosados, puertas, ventanas, etc.)
  - Ensayos de aislamiento acústico a ruido aéreo y de impacto de cerramientos horizontales
  - Ensayos de mejora de suelos a ruido de impacto
  - Ensayos de coeficientes de absorción de materiales acústicos (Cámara reverberante)
- ASESORÍA Y CONSULTORÍA ACÚSTICA
- MEDICIONES ACÚSTICAS "IN SITU", acreditadas ENAC de:
  - Inmisión de ruido en viviendas. Ruido medioambiental. Aislamiento acústico a ruido aéreo entre locales. Aislamiento acústico a ruido de impacto. Aislamiento acústico de fachadas. Tiempo de reverberación. Ruido en puestos de trabajo. Potencia sonora de maquinaria.
- ENTIDAD DE INSPECCIÓN, acreditada ENAC en ruidos y vibraciones
- ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE IMPACTO ACÚSTICO
- DESARROLLO PROYECTOS DE I+D+i
- PERITACIONES ACÚSTICAS
- MAPAS DE RUIDO

ENAC  
ENSAYOS  
Nº 149 / E1167

ENAC  
INSPECCIÓN  
Nº 149 / E1167

Tel.: 983 361 326

Fax: 983 361 327

E-mail: [info@audiotec.es](mailto:info@audiotec.es)

Web: [www.audiotec.es](http://www.audiotec.es)

Ctra. Burgos-Portugal Km.116  
Apdo. Correos 490  
47080 - VALLADOLID  
ESPAÑA

Centro de Acústica AUDIOTEC  
Parque Tecnológico de Boecillo, Parc. 28 - 30  
Apdo. Correos 490  
47080 - VALLADOLID  
ESPAÑA

