

Los instrumentos de arco y el *tono del lobo*



Vicente Pastor García

Conservatorio Superior de Música «Joaquín Rodrigo». Valencia
pastorcivene@yahoo.es

PACS: 43.75.De

Resumen

Los instrumentos de arco son susceptibles a sufrir el *tono del lobo*, particularmente el violonchelo debido a ligeras imperfecciones en su construcción. Este interesante fenómeno se genera como resultado de un acoplamiento por medio del puente entre dos sistemas resonantes: la cuerda y el cuerpo. El *tono del lobo* puede explicarse en términos de *osciladores acoplados e impedancia*, pero también aplicando el concepto del *mínimo de fuerza del arco requerida sobre la cuerda*. Después del descubrimiento de Helmholtz [1] del movimiento de una cuerda frotada, las contribuciones de Raman [2] y Schelleng [3] constituyen la base del conocimiento acerca de este fenómeno.

El presente artículo pretende aproximar al músico de cuerda al conocimiento sobre la acústica de su instrumento por medio de la comprensión del fenómeno del *tono del lobo*. Para ello se revisan las principales teorías acerca de este fenómeno, y se analizan y discuten los fenómenos y factores implicados con un lenguaje no matemático.

Abstract

Bowed string instruments are susceptible to wolf tone, particularly the cello due to slight imperfections in its construction. This interesting phenomenon is generated as a result of coupling through the bridge between two resonant systems: string/body. Wolf tone can be explained in terms of coupled oscillators and impedance, but also applying the concept of minimum bow force needed on the string. After the Helmholtz's discovery [1] of the motion of a bowed string, the contributions of Raman [2] and Schelleng [3] are the basis of knowledge about this phenomenon.

This article aims to approach the string players to the knowledge on the acoustics of the instrument by understanding the phenomenon wolf tone. We review the main theories about this phenomenon and analyze the factors involved with a non-mathematical language.

1. Introducción

El fenómeno del *tono del lobo* en los instrumentos de arco ha sido objeto de diversos estudios por parte de científicos y músicos en orden a comprender el complejo comportamiento acústico mostrado por estos instrumentos, pero también para proporcionar directrices que puedan contribuir a controlar esta disfunción por parte de los instrumentistas. Físicamente, el *tono del lobo* se genera debido a una fuerte interacción ente la cuerda y el cuerpo del instrumento que da como resultado un fenómeno de acoplamiento, por medio del puente, entre la frecuencia fundamental de oscilación de la cuerda frotada y la fre-

cuencia de la resonancia principal del cuerpo del instrumento.

Usando un microscopio de vibración, Herman von Helmholtz [1] fue el primero en utilizar el denominado efecto *Lissajous*¹ para estudiar los patrones de una cuerda de violín frotada. Con este método pudo determinar el movimiento de empuje y desliz de la cuerda —*stick-slip*—, conocido como *movimiento Helmholtz*, y deducir una forma de onda en dientes de sierra. Este científico también identificó algunos parciales en los tonos de los violines utilizando resonadores esféricos de varios tamaños —*resonadores Helmholtz*—, de ahí que la resonancia

¹ Este efecto es observable cuando un medio tiene un regular y repetitivo patrón de movimiento.

del aire incluido en el cuerpo se denomine *resonancia Helmholtz*. Sus estudios psicoacústicos y físicos se compendian en su magnífico libro *On Sensations of Tone* [1].

Después del descubrimiento de Helmholtz del movimiento de una cuerda frotada, Raman [2] fue uno de los primeros autores en aportar una explicación cualitativa del fenómeno del *tono del lobo* en estos instrumentos desde un enfoque del dominio del tiempo y utilizando el *movimiento Helmholtz* y el concepto del *mínimo de fuerza de presión del arco sobre la cuerda*. Sus estudios le permitieron describir el *tono del lobo* como una alternancia entre la frecuencia fundamental de la cuerda y su octava.

Posteriormente Schelleng [3] discutió por primera vez la cuestión de la susceptibilidad de un violonchelo al *tono del lobo* aplicando ideas básicas de un circuito eléctrico y utilizando un enfoque lineal basado en el dominio de la frecuencia. Sus estudios sobre la relación de impedancia entre la cuerda y el cuerpo y sobre el factor de calidad de la resonancia del cuerpo responsable del *lobo* le permitieron deducir la división de la frecuencia fundamental en dos frecuencias y explicar por tanto el fenómeno en términos de pulsaciones entre ambas frecuencias.

Firth y Buchanan [4] confirmaron los trabajos de Schelleng y concluyeron que cuando la frecuencia de vibración se aproxima a la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo el cambio producido es no lineal, dado que el *tono del lobo* no se genera en una sola frecuencia, sino más bien dentro de un rango de frecuencias.

Los experimentos y observaciones de Benade [5] basados en las teorías de Helmholtz, Raman y Schelleng han aportado una mejor comprensión del fenómeno del *lobo*. Asimismo, pudo observar cómo pueden generarse otros componentes armónicos en el *tono del lobo*, de forma análoga a los multifónicos producidos en un instrumento de viento.

Gough [6] primero y más tarde Woodhouse [7] aportaron un nuevo criterio para explicar la susceptibilidad del *tono del lobo* basado en el punto de contacto del frotamiento del arco sobre la cuerda.

Otros autores como McIntyre, Schumacher y Woodhouse [8], y más recientemente Inácio, Antunes y Wright [9] han estudiado este fenómeno usando simulaciones por ordenador. Estos últimos autores pudieron relacionar la frecuencia de pulsación del *tono del lobo* con las condiciones en las que se toca el instrumento.

El presente trabajo pretende explorar las teorías acerca del fenómeno del *lobo* y proponer una formulación cualitativa en base a las lecturas críticas de los autores y al análisis espectral del sonido, que pueda aproximar al

músico a la comprensión de este fenómeno. El artículo se estructura en tres secciones y unas conclusiones. En la primera sección se aportan los principios acústicos, analizando todos los fenómenos y factores involucrados en la generación del *tono del lobo*. En la siguiente sección se describe brevemente el sistema acústico del instrumento y su funcionamiento. En la última sección se procede a caracterizar el *tono del lobo* en base a las lecturas críticas y el análisis espectral, y se propone una formulación cualitativa. Por último, se revisan y analizan los métodos de control y/o eliminación de este fenómeno y sus efectos en el análisis espectral.

2. El sistema acústico y su funcionamiento

Los instrumentos de arco constituyen una familia orquestal que está compuesta por el violín, la viola, el violoncelo y el contrabajo. Los elementos que componen estos instrumentos son muy similares. Su tamaño está directamente relacionado con la altura del sonido y por lo tanto también la longitud de sus cuerdas.

En el caso del violín, las cuerdas están afinadas por quintas, a Sol_3 (196 Hz), Re_4 (293,6 Hz), La_4 (440 Hz) y Mi_5 (659,3 Hz), de acuerdo al sistema temperado, y su rango tonal se sitúa entre el Sol_3 y el Mi_7 . La longitud del instrumento abarca aproximadamente 325 mm y el ancho entre 20 y 35 mm.

La viola es algo más larga y pesada que el violín. Sus cuerdas están afinadas a Do_3 (130,8 Hz), Sol_3 (196 Hz), Re_4 (293,6) y La_4 (440 Hz). Cada cuerda está a una quinta perfecta menor que las del violín, lo que significa que la frecuencia de cada cuerda se ha reducido en un factor de 2/3. Su estructura y técnica de ejecución es muy similar a la del violín. Su rango de frecuencia está por encima de las tres octavas, del Do_3 al La_6 . Una viola de concierto mide aproximadamente 66 cm.

El violonchelo es el miembro bajo de la familia. Sus cuatro cuerdas se afinan una octava por debajo de la viola, a Do_2 (65,4 Hz), Sol_2 (98 Hz), Re_3 (146,8 Hz) y La_3 (220 Hz). El cuerpo de un violonchelo mide alrededor de 755 mm, y es bastante más profundo que el de un violín o una viola. Su arco mide algo menos que el de un violín o la viola, alrededor de 710 mm. Las dimensiones de su cuerpo no están perfectamente escaladas con las de un violín, aunque el hecho de tener unos costados más altos le permite completar un rango tonal adecuado, entre el Do_2 y La_5 .

El contrabajo es el miembro menos estandarizado en cuanto a su forma y proporciones. Sus cuerdas están afinadas por cuartas, a Mi_1 (41,2 Hz), La_1 (55 Hz), Re_2 (73,4 Hz) y Sol_2 (98 Hz). Su rango de frecuencia se en-

cuentra alrededor de las tres octavas, entre el Mi_1 y el Do_5 . La longitud de un contrabajo normal de orquesta es de 1150 mm aproximadamente, aunque se construyen modelos más grandes.

El arco de estos instrumentos se fabrica con crines de caballo o cerdas, tensados entre los dos extremos de una delgada varilla de madera construida típicamente con madera de Pernambuco. El alza movable del arco se conecta a un tornillo lo cual hace posible modificar la tensión de las cerdas. El pelo se frota con resina para incrementar la fricción entre el arco y las cuerdas.

El sistema acústico de estos instrumentos consta de varios elementos distintos e interconectados que trabajan de forma cooperativa para generar el sonido del instrumento: el excitador del sonido, que consiste en el trabajo cooperativo de las cuerdas y el arco; el resonador, que lo constituye el cuerpo con sus resonancias naturales responsables de la calidad del tono y de la radiación del sonido; el puente, que transfiere la energía mecánica de las cuerdas al cuerpo, conectando ambos sistemas oscilantes. Además, dispone de una barra armónica para distribuir la energía a toda la tapa armónica y el alma, responsable de transmitir la energía de la tapa armónica al fondo y soportar las fuerzas que ejerce el puente.

Para convertir el suministro de energía en oscilaciones transversales, el músico de cuerda utiliza un arco con el que frota constantemente la cuerda. La variación friccional entre la cuerda y el arco mantiene las oscilaciones de la cuerda que suministran la energía al cuerpo resonador en una frecuencia particular, determinada por la longitud de la cuerda, que a su vez depende de la digitación aplicada por el músico. El periódico movimiento de stick-slip

del pelo del arco presionando la cuerda constituye el mecanismo de excitación en estos instrumentos. Un ciclo de este movimiento se sincroniza con el modo fundamental de la cuerda. Una proporción de esta energía en forma de onda mecánica se drena por el puente al cuerpo, mientras que el resto es reflejada. Estas proporciones vienen determinadas por la impedancia acústica del puente. Las ondas reflejadas son interferidas por nuevas ondas inyectadas por el músico, lo que da lugar a un patrón de vibración definido como onda estacionaria o modo de vibración, el cual almacena la energía en la cuerda. Este patrón está caracterizado por presentar zonas de máxima vibración —vientres o zonas ventrales— y zonas de cero vibración —nodos o líneas nodales—, en función de la fase con la cual se han interferido.

El puente transfiere parte de la energía de vibración de la cuerda al cuerpo del violonchelo y es muy eficiente en la radiación de frecuencias próximas a su frecuencia de resonancia, en la gama de 3000 Hz en un violín y en los 1000 Hz en un violonchelo. Dispone de dos pies que se apoyan sobre la tapa superior. Debajo del pie de las cuerdas agudas —debajo de la cuerda de Mi — se sitúa el alma, que es un pequeño cilindro de madera que conecta la tapa con el fondo. El alma soporta las fuerzas del puente sobre la tapa y transmite la energía de la tapa al fondo. Debido a la mayor rigidez del fondo en comparación con la de la tapa, el alma reduce el movimiento de este pie de forma considerable. Por su parte, el otro pie descansa sobre las cuerdas graves y tiene más libertad para moverse hacia arriba y abajo. Debajo de este pie, en el interior del cuerpo, se sitúa la barra armónica que cruza prácticamente toda el área de la tapa en dirección paralela a las cuerdas. Debido al diferente grado de

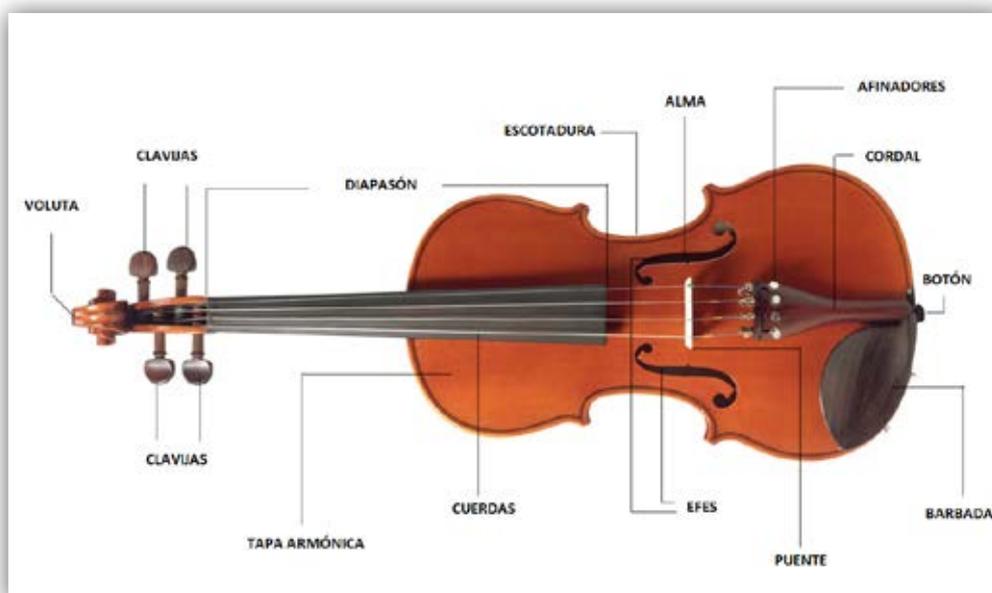


Figura 1. Partes de un violín.

rigidez de ambos pies, cuando el músico frota la cuerda con su arco el puente pivota sobre el pie de las cuerdas agudas, lo que contribuye a la transmisión de energía hacia el cuerpo. La posición exacta del alma tiene un efecto notable en la calidad del instrumento, de forma que cualquier ligero cambio en su ubicación puede modificar la respuesta del instrumento.

La energía mecánica transferida por el puente alcanza el cuerpo del instrumento, el cual es excitado en una de sus frecuencias de resonancia. En esencia, la función básica del cuerpo es convertir las vibraciones de la cuerda frotada en ondas sonoras radiadas al exterior del instrumento. En este sentido, las cuerdas por sí solas no son muy eficientes para radiar sonido, debido a la escasa área que cubren, de manera que precisa la contribución del cuerpo del instrumento para transmitir la energía vibracional de la cuerda en el aire como el sonido que percibimos. Una vez que uno o varios de estos modos de resonancia es excitado en su frecuencia natural, se produce un enganche con la frecuencia de vibración de la cuerda, lo que da lugar a la resonancia del cuerpo y la subsiguiente radiación del sonido con sus parciales correspondientes que percibimos con un timbre determinado. En este sentido, la calidad del tono de un instrumento de arco está determinada por sus modos de vibración. Por esta razón, cuantos más armónicos estén presentes en la vibración y más relacionados armónicamente se hallen, más calidad tendrá el sonido producido. Sin embargo, a diferencia de un instrumento de viento, los modos de vibración del cuerpo de estos instrumentos no responden a una sola frecuencia, sino a un rango de varios semitonos. El reto del constructor es encontrar y seleccionar las frecuencias de estas resonancias del cuerpo para que de forma combinada respondan y cubran el rango total de frecuencia del instrumento con los mayores niveles de calidad tonal.

Por último, los oídos o efes conectan el aire de dentro con el de afuera y aumentan la elasticidad de la tapa, además son muy eficientes en la radiación del sonido de la frecuencia principal de la resonancia del aire incluido. Su ubicación y el área de su abertura determinan, junto con la flexibilidad de las paredes del cuerpo, la frecuencia principal de la resonancia del aire.

3. Marco teórico

El *tono del lobo* es el resultado de una disfunción acústica que da lugar a un sonido fluctuante en frecuencia e intensidad —con pulsaciones que oscilan en un rango de entre 5 y 10 Hz—. Sobreviene cuando la frecuencia de oscilación de la cuerda coincide o se aproxima a la frecuencia principal de resonancia del cuerpo —aquella en la que todo el cuerpo vibra—. Como resul-

tado de este acoplamiento, el músico pierde el control del tono momentáneamente. En condiciones normales, cuando se produce esta coincidencia entre frecuencias de las oscilaciones de las cuerdas y el cuerpo con un acoplamiento débil, sobreviene la resonancia, lo que se traduce en un sonido rico y estable. Sin embargo, en la generación del *tono del lobo* coexisten varios factores a través de los cuales es posible caracterizarlo: el *movimiento Helmholtz* de las cuerdas, el *mínimo de fuerza del arco requerido sobre la cuerda*, la *resonancia* del cuerpo y del aire incluido, la *oscilación acoplada* entre dos sistemas resonantes —la cuerda y el cuerpo—, las *pulsaciones* y la *impedancia* como una función de transferencia de la energía o la fuerza

En esta sección vamos a proceder a analizar estos fenómenos y factores por separado, antes de proceder a la formulación y caracterización del fenómeno del *tono del lobo*.

3.1. La vibración de las cuerdas: *movimiento Helmholtz*

El sonido en los instrumentos musicales depende básicamente de la vibración de un cuerpo en frecuencias estables. Estas vibraciones dependen de tres factores: el desplazamiento, la fuerza restauradora —entendida como algún mecanismo que trabaje en oposición al desplazamiento— y la inercia. Esta fuerza restauradora viene dada en los instrumentos musicales por la elasticidad o la resistencia de los materiales vibrantes.

La vibración transversal de la cuerda tensada sujeta en sus dos extremos constituye el más simple ejemplo de un

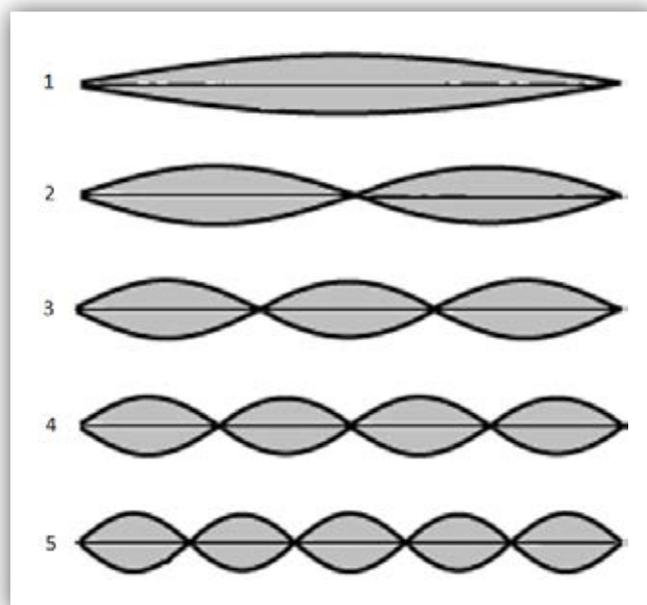


Figura 2. Modos de vibración de una cuerda sujeta en los extremos.

sistema vibratorio resonante que dispone de una serie infinita de modos de vibración con sus frecuencias naturales correspondientes. Estas frecuencias se obtienen relacionando la longitud de onda con la velocidad de la onda y son dependientes de la longitud, la masa y la tensión de las cuerdas.

$$fn = \frac{c}{\lambda n} = n \frac{c}{2L}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

donde L es la longitud de la cuerda y c la velocidad de la onda transversal sobre la cuerda, que se obtiene como $c = \sqrt{T/\mu}$, donde T es la tensión y μ es la masa por unidad de longitud.

Estos modos de vibración responden a un patrón definido por un particular movimiento de las cuerdas, conocido como *stick-slip* —adherencia-deslizamiento—. Efectivamente, si observamos el movimiento de una cuerda tensada que vibra, ésta parece moverse hacia atrás y adelante en una forma de parábola. Sin embargo, en la práctica la forma de onda es más compleja. Helmholtz [1] fue el primero en formular matemáticamente el comportamiento de una cuerda al ser frotada por un arco. Mediante un microscopio de vibración propuesto por *Lissajous*, observó que cuando la cuerda se frota se forman dos líneas rectas con una curva en el punto de intersección, en lugar de la forma sinusoidal normal, dando lugar a un movimiento en V que es conocido como *movimiento Helmholtz*. Esta curva o perturbación —*Helmholtz corner*— viaja por toda la cuerda reflejándose en los extremos —las clavijas y el puente—. El viaje de ida y vuelta, que se repite 440 veces por segundo cuando se toca el La patrón, constituye un período de la vibración, que a su vez equivale a una longitud de onda en su modo fundamental. Podemos observar esta dinámica en la figura 3. La acción del arco sobre la cuerda se describe como una acción *stick-slip*. El arco se adhiere a la cuerda moviéndose en la misma dirección —lo que constituye el factor desplazamiento— mientras el vértice o pulso de onda viaja al extremo derecho describiendo un patrón parabólico, se refleja y regresa —fase *stick*—. En esta fase la cuerda se mueve a la velocidad de arco. Cuando llega la perturbación al punto de contacto con el arco, se desencadena la acción deslizamiento de la cuerda —factor fuerza recuperadora—, y el pulso de onda viaja ahora al extremo izquierdo, hasta que la cuerda pasa por su punto de equilibrio y llega a su máximo de amplitud —factor inercia—. En esta segunda fase —*slip*—, la velocidad relativa es igual a la velocidad del arco dividida por $-\beta$, donde β es la distancia del arco desde el puente dividida por la longitud de la cuerda vibrante. En ese punto, de nuevo la cuerda es sujeta por las cerdas y se inicia un nuevo ciclo *stick-slip*. De esta forma, la curva se compone de dos parábolas con una amplitud máxima que es proporcional, dentro de los límites, a la velocidad del arco.

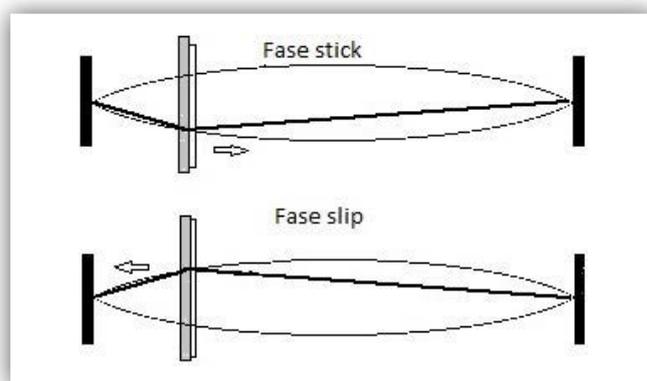


Figura 3. Representación simplificada del movimiento Helmholtz.

Cuando esto sucede, una proporción de la energía que llega al puente en forma de pulsos de onda —*Helmholtz corner*— es reflejada y otra proporción se transfiere al cuerpo del instrumento para excitar sus resonancias. La proporción de energía reflejada o transferida es función de la impedancia acústica². Una vez se establece el ciclo *stick-slip*, se constituye una onda estacionaria en la cuerda que almacena la energía que se alimenta por medio de las sucesivas reflexiones. Esta onda estacionaria, a su vez, suministra la energía necesaria a las frecuencias de resonancia excitadas del cuerpo, lo que da lugar a un sonido rico y estable. Este movimiento ofrece una forma de onda en dientes de sierra.

Con el proceso descrito se produce el sonido fundamental cuya frecuencia depende del tiempo que ha invertido el arco en completar esta acción. Nótese que durante la fase de adherencia el movimiento de la cuerda es más lento que durante la fase de deslizamiento debido a que la fricción estática es mayor que la fricción dinámica o cinética. Además, la acción de la resina en el arco incrementa esta diferencia entre los coeficientes de fricción.

El físico indio Raman [2], laureado en 1930 con el Nobel en Física por sus trabajos en óptica, amplió esta formulación sobre las vibraciones de las cuerdas frotadas por un arco introduciendo la variable de amortiguación de la cuerda que no había considerado Helmholtz. Posteriormente Schelleng [3] añadió un concepto nuevo que definía las necesidades de la presión o fuerza que el arco ejerce sobre la cuerda: *el mínimo de presión o fuerza del arco sobre la cuerda*. En este sentido, Benade [4] concluyó que *el mínimo de presión del arco sobre la cuerda requerido para mantener las oscilaciones de un movimiento del tipo Helmholtz-Raman, es proporcional a la velocidad con la cual se mueve el arco a través de la cuerda*.

Posteriores trabajos, entre ellos el de Cremer [10] aportaron nuevos trabajos sobre el tema concluyendo

² Véase apartado 3.2.

que el patrón regular del *movimiento Helmholtz* depende de la presión del arco y del amortiguamiento, pero también de otros parámetros como la inarmonicidad.

3.2. La impedancia acústica: el puente

La proporción de transferencia de las vibraciones de un medio a otro depende de la magnitud relativa de las impedancias de dos medios. Desde el punto de vista físico, la impedancia acústica (Z) puede definirse como la relación entre la fuerza conductora y la velocidad. Por tanto, puede entenderse como la resistencia que ofrece el cuerpo a la onda o la reacción de este a una vibración en una frecuencia conducida por una cuerda frotada. En oposición a la impedancia, la admitancia mecánica indica la proporción de energía que un medio puede transmitir, siendo por tanto su recíproca.

$$Z = \frac{F}{v} \quad (2)$$

En sentido lato, la calidad del tono en un instrumento de arco viene determinada en gran medida por la capacidad del puente de transferir energía de las cuerdas al cuerpo del instrumento por medio de sus dos pies. La transferencia de energía depende de la impedancia del puente para la fuerza conductora imprimida por las cuerdas. La impedancia puede ser medida en el puente o en otro punto del sistema con una cabeza que incluye una fuerza transductora y un acelerómetro con cristales piezoeléctricos, y una masa inercial sujeta a uno de los cristales. De esta forma, se mide en ese punto la fuerza aplicada y la velocidad, obteniéndose la impedancia de transferencia, esto es, la proporción de energía transferida desde la fuerza conductora —las cuerdas vibrantes—.

Reinecke [11] midió la impedancia de entrada y las funciones de transferencia de la fuerza de las cuerdas sobre los pies del puente, observando resonancias entre 1000 y 2000 Hz en el puente de un violonchelo y entre 3000 y 6000 Hz en el de un violín. Estas resonancias incrementan notablemente los parciales de las cuerdas en esa región, como se puede observar en la figura 7. Es esa esa gama de frecuencias la amplitud de los parciales está controlada por las propiedades de transformación de la fuerza resonante del puente [5].

Posteriormente, Cremer [10] analizó las resonancias del puente de un violín con el método de interferometría holográfica, observando que en el puente del violonchelo se produce un movimiento de flexión en sus pies, mientras que en el del violín es más bien rotacional.

3.3. El cuerpo y la resonancia

El concepto de resonancia es entendido como la respuesta reforzada de un sistema a una fuerza motriz en

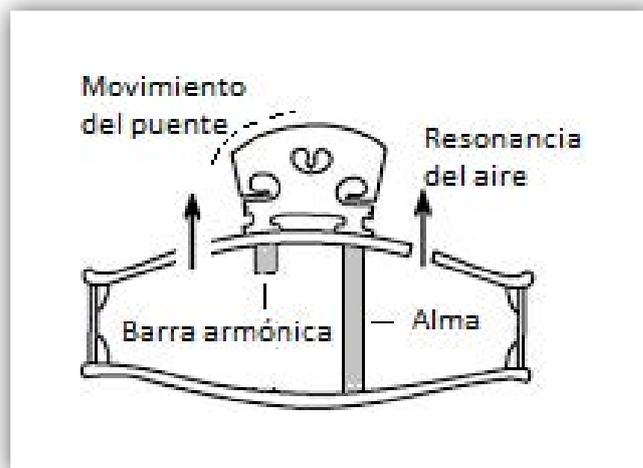


Figura 4. Movimiento del puente de un violonchelo sobre la tapa superior.

una frecuencia que coincide o se sitúa muy próxima a su frecuencia natural. La condición indispensable para que se produzca la resonancia es por tanto que interactúen dos elementos que vibren en la misma o muy próxima frecuencia: elemento excitador o conductor —la cuerda— y un cuerpo.

En el caso de los instrumentos de arco, el sistema acústico se compone de dos osciladores o resonadores, las cuerdas y el cuerpo. Adicionalmente, el puente también puede considerarse un resonador con una frecuencia o rango de frecuencias resonantes. Cada resonador produce una o varias *frecuencias de resonancia*. Las cuerdas disponen de un juego de modos de resonancia (fig. 2). Por su parte, el cuerpo de un instrumento de arco también produce varios modos de vibración con sus propias frecuencias de resonancia o armónicos, ya que además de la frecuencia principal de resonancia del volumen de aire contenido en él —la *resonancia Helmholtz*—, la tapa y el fondo disponen de un juego considerable de resonancias con sus respectivos armónicos o frecuencias, además de la frecuencia de resonancia principal del cuerpo, esto es, aquella en la que el cuerpo vibra como un todo.

Estas frecuencias pueden ser identificadas y caracterizadas mediante la respuesta en frecuencia o *sensibilidad de vibración* del cuerpo. Esta respuesta permite observar sus propiedades acústicas mediante su curva de respuesta que muestra la frecuencia, el ancho de banda y la altura de cada resonancia. Estas propiedades son relacionadas con las propiedades mecánicas del resonador: la masa, la rigidez y la fricción. Así, la *sensibilidad de vibración* puede entenderse como una medida del grado de facilidad mediante el cual las vibraciones pueden ser excitadas y sostenidas, y permite identificar los modos de vibración de un resonador tal como una tapa de un

violín [12]. En este sentido, el comportamiento vibracional del cuerpo depende de los modos de vibración que se producen básicamente por los movimientos acoplados de la placa superior, el fondo y el aire incluido en la caja, cada uno de ellos con una frecuencia de resonancia.

Estos modos de vibración han sido analizados e identificados por varios autores. El análisis modal se utiliza para describir las propiedades de una estructura elástica en términos de sus modos de vibración. Uno de los métodos consiste en excitar una estructura con una fuerza sinusoidal o impulsiva, y medir su respuesta en uno o varios puntos de forma mecánica con acelerómetros o sensores de velocidad, o bien ópticamente con sensores ópticos. Los parámetros modales pueden ser determinados desde esas funciones mediante las curvas obtenidas con un software en un ordenador [13].

Varios autores han utilizado el método de análisis modal mediante la técnica de excitación impulsiva o de impacto, entre ellos, Marshall [14] y Jansson, Bork y Meyer [15]. Menzel y Hutchins [16] y Luke [17] escanearon las placas con sensores ópticos. Técnicas de interferometría holográfica han sido empleadas por Stetson y Powell [18] y Jansson, Sundin y Molin [19], entre otros, grabando un holograma de una placa en reposo y otro de una en vibración, y creando así un patrón de interferencia entre ambos hologramas. Alonso Moral y Jansson [20] realizaron varios experimentos en el Royal Institute de Technology de Estocolmo utilizando para el análisis modal mediciones basadas en variar la frecuencia conductora mientras se mide la amplitud de vibración resultante utilizando un acelerómetro y un percusor con una fuerza transductora. Utilizando la transformada de Fourier de la fuerza y la aceleración para cada dos puntos obtuvieron las frecuencias de los modos vibracionales. Con este método, identificaron los modos de vibración de acuerdo al elemento primario vibrante, estableciendo sus influencias: a) los modos del aire incluido; b) los modos de la tapa superior; c) los modos de la tapa inferior; d) los mo-

dos del cuerpo en las cuales la tapa superior y la inferior se mueven de forma similar. Las resonancias o modos del cuerpo controlan las bajas frecuencias junto con la resonancia principal del aire, mientras que los modos de la tapa y el fondo cubren las medias y altas frecuencias. Por último, la resonancia del puente potencia las frecuencias más agudas. Alonso Moral [21] estudió las relaciones entre los modos de resonancia de las placas de un violín y los del cuerpo ya ensamblado con todas sus partes, encontrando diferencias significativas entre ellos.

El método de Chadlni ha sido frecuentemente usado por otros autores. Consiste en espolvorear algún tipo de partículas en una placa. Por medio de un oscilador y un amplificador, el altavoz produce un tono. La frecuencia del altavoz es ajustada hasta que coincide con la frecuencia de resonancia de la placa y entonces las partículas comienzan a vibrar con un patrón determinado, dibujando las líneas nodales, que indican las zonas donde no existe vibración.

Actualmente, los científicos también usan un método de cálculo llamado análisis de elementos finitos que descompone matemáticamente la forma compleja de las placas de un violín en un número de partes discretas, cuyo movimiento puede ser simulado numéricamente en un ordenador. El método asume que una estructura o sistema puede ser modelada mediante un ensamblaje de todos sus elementos conectados únicamente en puntos discretos, lo que permite dividir una estructura compleja en un número determinado de subestructuras [13].

Junto con la capacidad del puente de transferir energía al cuerpo, la calidad del tono en un instrumento de arco depende de la respuesta del cuerpo a cada frecuencia de vibración conducida desde la cuerda. Cada placa o tapa dispone de varias frecuencias de resonancia específicas. El cuerpo, sin embargo, tiene un juego más complejo de frecuencias de resonancia, ya que incluye las resonancias de la tapa y el fondo. A diferencia de las resonancias o armónicos de un instrumento de viento,

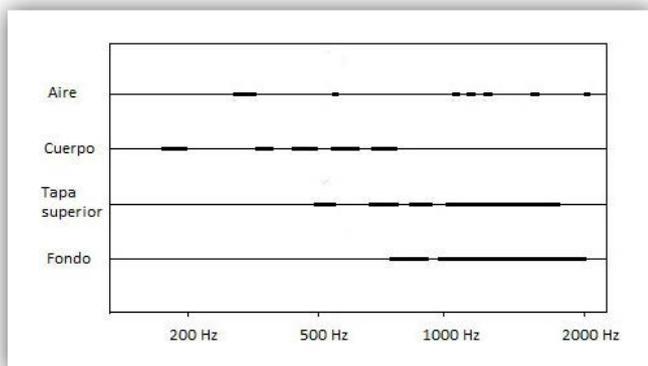


Figura 5. Rangos de frecuencia de los diferentes resonadores en un violín [21].

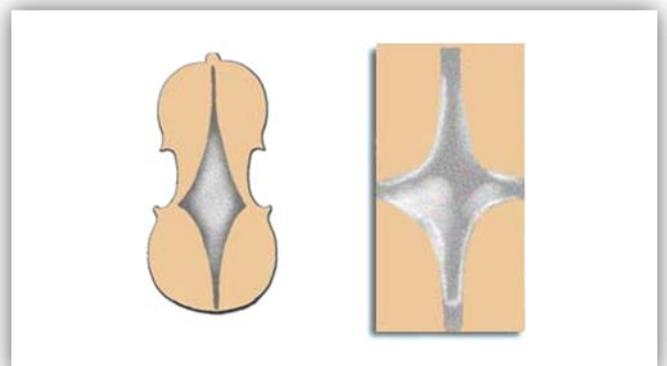


Figura 6. Izq.: Modo 1 del fondo de un violín; dcha.: modo 1,1 de una placa rectangular.

estas resonancias son inarmónicas, ya que no siguen la serie armónica, y por otro lado, no responden a una sola frecuencia sino más bien a un rango de frecuencia.

En este sentido, Benade [5] ha informado que el comportamiento acústico del cuerpo de un instrumento de arco presenta tres características que determinan sus características tonales: 1) la resonancia principal del cuerpo asociada con el modo más bajo de la resonancia del aire incluido en el cuerpo; 2) la resonancia principal del cuerpo asociada con la más simple de las vibraciones de las partes del cuerpo; 3) la frecuencia de resonancia del puente que incrementa las amplitudes de los parciales más altos, aquellos que se sitúan próximos a su frecuencia de resonancia.

Especialmente interesante es la influencia de la resonancia principal del aire con la resonancia principal del cuerpo. Schelleng [3] pudo demostrar esta influencia en el sonido de un violín mediante las curvas de ambas resonancias. Asimismo, la resonancia del aire está excitada por la misma acción oscilatoria de las paredes del cuerpo cuando vibran en la frecuencia principal del cuerpo. En este sentido, cuando se pasa del Sol₃ al La₄ en un violín, es posible notar con más intensidad el componente fundamental y su segundo armónico por el efecto combinado de la principal resonancia del aire y del cuerpo [5]. Los experimentos de Jansson y sus colegas [20] en el Royal Institute de Technology en Estocolmo demostraron, entre otros aspectos, este acople entre el segundo modo de la resonancia del aire y la principal resonancia del cuerpo.

Los modos de resonancia del aire también pueden interactuar en un instrumento de arco, produciendo efectos significativos en la amplitud de algunos parciales o en la radiación del sonido. Por ejemplo, bajo las condiciones del modo de aire excitado, la tapa superior se comporta de forma más rígida, lo que reduce la transmisión de energía vibratoria de las cuerdas al cuerpo. Las mayores

dimensiones del cuerpo del violonchelo producen un segundo modo de resonancia del aire a una frecuencia que se sitúa muy próxima a la octava alta de la frecuencia de su primer modo, a diferencia del amplio intervalo de quinta que se produce en el violín. Esta particularidad contribuye a que estos modos de la resonancia del aire se exciten fuertemente cuando el músico toque una nota en la frecuencia principal de resonancia del aire, ya que sus frecuencias se corresponden aproximadamente con el primer y segundo parcial de esa nota [5].

En la figura 8 —adaptada de Hutchings [22]— se ilustra la respuesta de sensibilidad de vibración en la curva de resonancia de un violín Stradivarius. Podemos observar cuatro picos más prominentes en la figura que corresponden a cuatro resonancias importantes. El pico señalado con la letra A indica una resonancia del cuerpo. Su frecuencia se produce una octava por debajo de la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo debido a la interacción con el segundo armónico de la cuerda Sol. Estas resonancias se producen por combinaciones de las resonancias del cuerpo con armónicos de las cuerdas que no son los fundamentales. Por ejemplo, si la cuerda produce una vibración en una frecuencia fundamental determinada, al mismo tiempo sus armónicos también están vibrando. El cuerpo puede no tener ninguna resonancia que se enganche con la frecuencia del modo fundamental de la cuerda, pero sí con el segundo modo o armónico. Por esta razón, el timbre de las notas del registro más grave de un instrumento de arco está influenciado por la fuerza del segundo armónico, tal y como se observa en la figura 7.

La resonancia indicada con la letra B corresponde a la resonancia de aire que, como ya se ha dicho, resulta de la vibración del aire incluido. Esta resonancia también se amplifica gracias a otra resonancia del cuerpo que se sitúa próxima a su frecuencia, de ahí su ancho de banda.

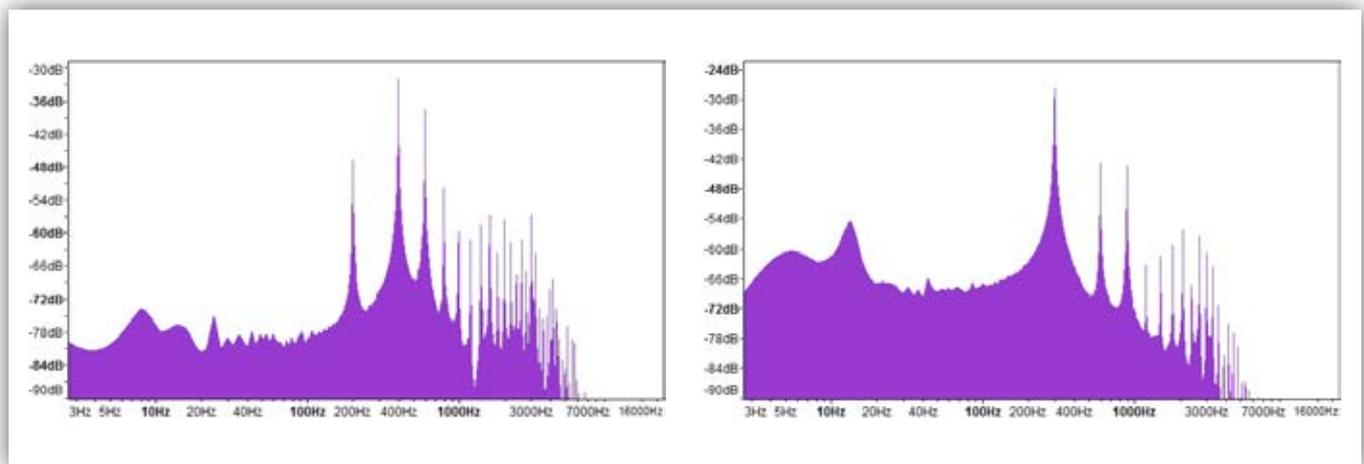


Figura 7. Espectro acústico: izq., Sol₂ a 196 Hz de un violín; dcha., Re₃ a 293 Hz (Resonancia del aire).

En un violín se sitúa cerca de la frecuencia de la cuerda de Re_4 , a 293 Hz, y en un violonchelo entre el Si_2 y el Do_3 , a 125 Hz aproximadamente. La frecuencia de esta resonancia está controlada además de por el volumen de aire contenido en el cuerpo, por la flexibilidad de las paredes, el tamaño de los orificios de las efes y en cierta medida por la posición del alma. El volumen de aire funciona como una cuerda y la masa constituye el aire alrededor del orificio de las efes. Cuando esta resonancia se excita, una cantidad considerable de aire se mueve dentro y fuera de las efes. En función de estas variables, pueden excitarse otras resonancias del aire a otras frecuencias que corresponden a 460 Hz, 1100 Hz, 1200 Hz, 1300 Hz.

El pico indicado con la letra C corresponde a la resonancia principal del cuerpo, aquella en la cual el cuerpo vibra como un todo expandiendo y contrayendo su volumen de aire. En un violín oscila entre los 440 y los 500 Hz, y en un violonchelo entre los 147 Hz y los 196 Hz, siendo más típica en los 175 Hz. En un violín, la segunda resonancia del aire se sitúa próxima a esta resonancia, a 460 Hz, por lo que cuando ambas se combinan producen un ancho pico de resonancia alrededor de la frecuencia de la cuerda La, a 440 Hz, dando el mejor tono del instrumento. Lo mismo sucede en los otros miembros de la familia.

Finalmente, la letra D indica un cuarto pico o una zona con una anchura considerable, que corresponde a la sensibilidad de vibración del puente para ese rango de frecuencias.

3.4. Oscilador acoplado y pulsaciones: cuerdas vs cuerpo

Un tercer fenómeno involucrado en la generación del *tono del lobo* es el de un oscilador acoplado. Este fenómeno puede observarse en un sencillo experimento que consiste en un artilugio con dos pies al que se le sujeta una cuerda por sus extremos situados a la misma altura. Se atan dos péndulos iguales a dos puntos simétricos de la cuerda. Si se desplaza uno de los péndulos de su po-

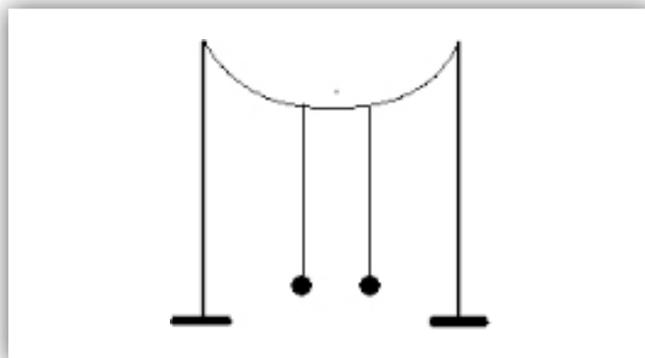


Figura 9. Representación esquemática de un oscilador acoplado.

sición de equilibrio y se libera, el péndulo empieza a oscilar pero su amplitud disminuye con el tiempo, mientras que el otro péndulo que estaba inicialmente en reposo, empieza a oscilar con una amplitud creciente. En rigor, el efecto neto del acoplamiento de dos o más osciladores se puede describir como un intercambio gradual de energía cinética entre ellos, en virtud de la cual mientras uno oscila con la máxima amplitud, el otro cesa en su oscilación, y viceversa. O dicho de otro modo, la oscilación de ambos péndulos se va desfasando periódicamente hasta cancelarse, para volver a ponerse en fase. Si la influencia de uno sobre el otro es débil, se dice que el acoplamiento es mínimo, y el sistema no se modifica. Si por el contrario los dos sistemas interactúan considerablemente, se dice que el acoplamiento es fuerte, lo que puede dar lugar en un instrumento de arco al *tono del lobo*.

El resultado del acoplamiento es una suerte de tono pulsante mientras las resonancias de ambos sistemas se alternan, que puede explicarse también en términos de pulsaciones, esto es, un caso especial de interferencia que se produce cuando en un punto interfieren dos ondas de frecuencias ligeramente distintas (fig. 10). En esta situación, en algún punto fijo las ondas están periódicamente en fase o fuera de ésta, correspondientes a una alternancia temporal entre interferencia constructiva y destructiva. En estos casos nuestro sistema auditivo no es capaz de percibir separadamente las dos frecuencias presentes, sino que se percibe una frecuencia única promedio pero que cambia en amplitud a una frecuencia que es la diferencia de las dos frecuencias interferidas, siempre y cuando la diferencia entre las dos frecuencias implicadas se encuentre por encima del límite de la diferencia apenas perceptible (DAP).

4. Formulación y caracterización

Para el desarrollo de esta sección se ha utilizado una estrategia metodológica de tipo documental basada en lecturas críticas de las fuentes mencionadas en la introducción del estudio, combinada con una metodología



Figura 8. Curva de resonancia de un violín Stradivarius (adaptada de Hutchings [17]).

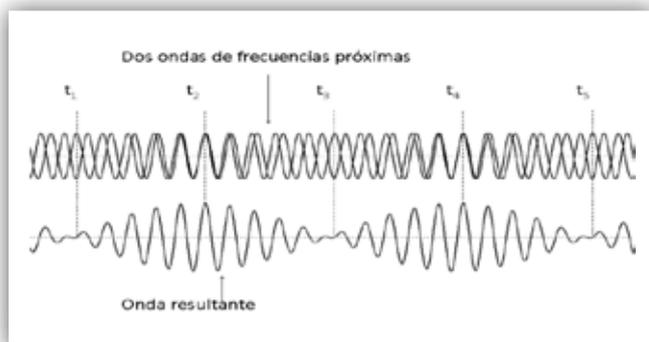


Figura 10. Forma de onda resultante de la superposición de dos frecuencias ligeramente diferentes (pulsaciones).

cuantitativa basada en la medición y análisis de unas muestras sonoras. Con el uso de ambas metodologías se ha procedido a una formulación cualitativa del fenómeno del *tono del lobo*.

En el experimento se han tomado varias muestras de sonidos donde se reproduce el *tono del lobo* en un violonchelo con y sin supresor, además de con el uso de varios métodos o trucos para minimizar sus efectos. El experimento se ha desarrollado en el Estudio de Grabación del Conservatorio Superior de Música «Joaquín Rodrigo» de Valencia, en un ambiente semianecóico. El dispositivo experimental ha consistido en un micrófono de patrón cardioide modelo *U-87 Newman* y un preamplificador de micro modelo *LA610MK2 Universal audio* para la captación de las muestras; tarjeta de sonido Pro Tools con interface 96 I/O para la digitalización y grabación a disco duro y el software *Audacity* para el análisis de las muestras. El instrumento utilizado para la emisión de las muestras ha sido un violonchelo construido por *Bronek Cison* en Chicago en el año 2004 —número de serie 6534—. El supresor del *lobo* empleado ha sido el modelo *Mberg lup-x*.

El análisis de las muestras sonoras ha permitido verificar que el *tono del lobo* sobreviene cuando la frecuencia de oscilación de la cuerda excita, a través del puente, la frecuencia principal de resonancia del cuerpo. En los violonchelos, este tono se suele producir con más frecuencia entre las notas Mib_2 , Mi_2 , Fa_2 y $Fa\#_2$ producidas con la 3ª cuerda. En el instrumento utilizado, el *tono del lobo* aparece en el Fa_2 de la 3ª cuerda, a 175 Hz.

El mecanismo de generación del *tono del lobo* puede formularse aplicando un modelo lineal, pero también mediante una aproximación no lineal. Un sistema lineal puede entenderse como aquel en el que la respuesta del sistema es proporcional al excitador o al estímulo. En una cuerda, la respuesta es lineal cuando la fuerza restauradora es proporcional al desplazamiento. La vibración resultante de estos sistemas es armónica, y pueden expresarse por tanto como un movimiento armónico simple.

En este caso, para la solución de la ecuación diferencial lineal es suficiente con aplicar el principio de superposición, combinando las soluciones simples de cada sistema o simplemente sumando las dos respuestas. Sin embargo, en las vibraciones de sistemas no lineales —tales como la interacción del arco con la cuerda— el resultado no es un movimiento armónico simple, sino complejo, en el cual no es posible aplicar el principio de superposición para la solución de la ecuación. En este caso, la respuesta del sistema no es proporcional al estímulo o excitador, de forma que si se dobla la fuerza, por ejemplo, la respuesta no es el doble [5].

4.1. Aproximación al modelo lineal: oscilador acoplado

Para estudiar el fenómeno del *tono del lobo*, puede aplicarse una formulación linealizada analizando el acople en el dominio del tiempo entre dos sistemas resonantes —las cuerdas y el cuerpo— que da lugar a dos frecuencias, una por cada sistema. Como se discutió en la sección 3.1, cuando la resonancia principal del cuerpo se excita, se requiere más energía de la cuerda de la que el propio arco puede suministrar. Cuando el músico frota la cuerda con el arco en o cerca de la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo el *movimiento Helmholtz* se establece y la energía en esa frecuencia fluye por medio del puente al cuerpo. Cuando el cuerpo ya no puede almacenar más energía, se produce una retroalimentación de energía en las cuerdas por parte de la vibración fuerte del cuerpo, interrumpiendo la acción del arco sobre la cuerda y cancelando por tanto su vibración momentáneamente. Seguidamente el arco, que todavía se está moviendo, vuelve a activar la vibración de la cuerda. Si las dos resonancias son muy activas, resulta prácticamente imposible para el músico suministrar la suficiente energía con el arco para mantener la energía de los dos sistemas, produciéndose un tono pulsante o pulsaciones mientras las resonancias de ambos sistemas se alternan (fig. 11). Como resultado de esta interacción entre la frecuencia de oscilación de la cuerda y la de la resonancia principal del cuerpo, el músico pierde el control del instrumento eventualmente.

Por consiguiente, desde el punto de vista del modelo lineal este fenómeno puede explicarse en términos de **sistemas acoplados** y **pulsaciones**. En rigor, se trata de la interacción de dos frecuencias que están producidas por el mismo excitador aunque una proviene de la cuerda y otra del cuerpo del instrumento.

Como resultado de esta oscilación acoplada entre dos frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental del oscilador conductor se divide en dos frecuencias, una ligeramente por encima y otra ligeramente por debajo de



Figura 11. Envolvente del *tono del lobo* de un violonchelo en un ciclo (9 Hz), a 175-182 Hz (F_{a_2}).

la fundamental. En la figura 12 se muestra el espectro acústico del *tono del lobo* — F_{a_2} — en un violonchelo, a 175 Hz. Se puede observar claramente la fundamental dividida en dos picos de 170 y 179 Hz respectivamente. Básicamente, donde cada sistema tendría un pico de resonancia definido, el sistema acoplado tiene dos picos que percibimos como una frecuencia pulsante. Esta formulación estaría en consonancia con la enunciada por Schelleng [3] y operaría en el dominio de la frecuencia. Además, según este autor, cuando el *tono del lobo* surge, los armónicos pares se mantienen estables durante un ciclo, mientras los impares van creciendo y decreciendo periódicamente. De esta forma, la percepción del tono se obtiene cuando los armónicos impares tienen una amplitud considerable, mientras que los armónicos pares son percibidos como un tono a la octava superior.

En esta aproximación es necesario también considerar la linealización en términos de impedancias de los dos sistemas resonantes. En condiciones normales, la impedancia de la cuerda es aproximadamente 1/10 de la impedancia del cuerpo. Esta diferencia de impedancias permite la reflexión necesaria para que se establezca la onda estacionaria en la cuerda. Sin embargo, cuando la frecuencia de oscilación de la cuerda se aproxima o coincide con la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo con un importante coeficiente de amortiguación, la impedancia del cuerpo se reduce considerablemente, aproximándose a la de la cuerda. En estas condiciones,

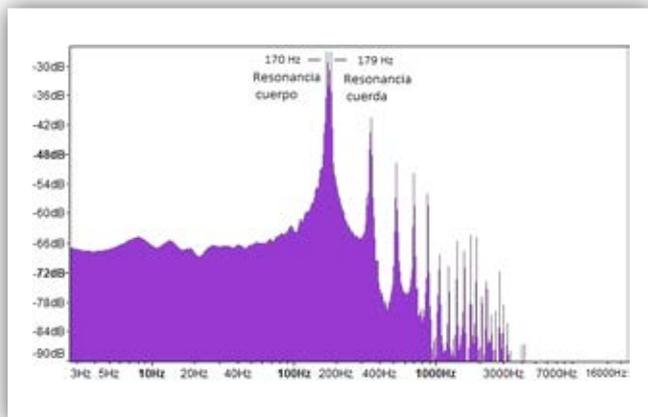


Figura 12. Espectro acústico del *tono del lobo* en un violonchelo (F_{a_2} , a 175 Hz).

resulta imposible mantener el régimen de oscilación de la frecuencia fundamental de la cuerda [5].

Asimismo, el *tono del lobo* puede también explicarse aplicando el concepto de **impedancia** en el puente. Efectivamente, en condiciones normales el puente provee una fuerte reflexión a las oscilaciones de las cuerdas, lo que permite construir una onda estacionaria estable. Sin embargo, a las resonancias del puente la impedancia alcanza el valor mínimo, mientras que la transferencia de fuerza tiene el máximo valor [13]. Por ello, cuando se produce esta interacción entre ambos sistemas oscilantes la impedancia del puente del instrumento se reduce de tal forma que la cuerda no puede mantener sus oscilaciones de forma estable ya que su energía se drena por el puente. Como la oscilación de las cuerdas se extingue, el cuerpo del instrumento tampoco recibe energía, lo que produce rápidamente el cese de su oscilación y la generación de un nuevo ciclo. En estas condiciones, las cuerdas y el cuerpo vibran en una suerte de alternancia de amplitud que pasa de un mínimo a un máximo. En este sentido, Benade [5] considera que el puente puede funcionar como una palanca de acoplamiento entre las cuerdas y el cuerpo para aquellas frecuencias por debajo del primer modo de resonancia del puente —alrededor de 1000 Hz—. Estas afirmaciones permiten justificar el acople de los dos sistemas oscilantes en el violonchelo.

4.2. Aproximación al modelo no lineal

La respuesta de un sistema no lineal depende de la frecuencia y la amplitud de la excitación. En el caso del violonchelo, podemos caracterizarlo como un sistema no lineal compuesto por dos osciladores, o dicho de otro modo, por un oscilador conductor y un resonador. En este caso, la fuerza imprimida al resonador depende de la amplitud de vibración del oscilador conductor. Ahora bien, a diferencia de la formulación lineal tratada en el apartado anterior, en este caso la fuerza del oscilador conductor depende de un elemento externo —el arco— que introduce dos variables, la velocidad del arco y la presión ejercida contra la cuerda, por lo que la aproximación lineal ya no es válida. Los efectos de estas variables, a su vez, son dependientes de la amplitud de la oscilación de la cuerda. En este sentido, la fuerza entre un arco y una cuerda depende de sus relativas velocidades. Como se enunció en la sección 3.1, el *movimiento Helmholtz* se establece como resultado del ciclo *stick-slip*. La alternancia entre estos dos tipos de fricción suministra el elemento no lineal al sistema.

Una característica derivada de los sistemas no lineales es la generación de nuevas frecuencias gracias a los componentes heterodinos adicionales y diferenciales que resultan de las sumas y restas de varios armónicos

presentes en la vibración. Estos componentes y su influencia en el timbre y en el *tono del lobo* han sido ampliamente estudiados por Benade [5].

Por consiguiente, dado que la fuerza imprimida al resonador por el oscilador conductor depende de estas variables, entonces podemos explicar también el fenómeno del *lobo* aplicando el modelo no lineal, en términos del **mínimo de fuerza requerida del arco** sobre la cuerda. En este sentido, para obtener un tono estable el músico debe seleccionar la velocidad del arco, el punto de contacto, la posición del arco y la fuerza con la que el arco presiona la cuerda (fig. 13). Para un valor determinado de la velocidad del arco y una posición dada, es necesario seleccionar la presión del arco dentro de un rango de valores que permitan establecer el *movimiento Helmholtz*, lo que dará lugar a un tono estable. El mínimo de fuerza del arco para proveer esa presión es requerido normalmente para cubrir las pérdidas de energía a través de las cuerdas y los soportes —clavijas y puente—. Cuantas más pérdidas de energía, más alto es el límite de fuerza requerida por el arco. Una vez se establece el *movimiento Helmholtz*, la energía se almacena en el cuerpo antes de construir la vibración. Durante este tiempo, se produce un progresivo incremento de pérdidas de energía desde la cuerda y por consiguiente el límite del mínimo de fuerza del arco también se incrementa. Por su parte, la vibración del cuerpo cesa momentáneamente dado que toda su energía ha regresado a la cuerda produciendo una bajada del límite de la fuerza del arco. En estas condiciones, si este límite supera el mínimo de fuerza del arco que el músico está aplicando en ese momento, el *movimiento Helmholtz* degenera en un doble régimen de *stick-slip*, dividiendo la frecuencia fundamental de la cuerda en dos frecuencias, una por encima y otra por debajo de su frecuencia, dando lugar al *tono del lobo*. La forma de onda en este caso degenera en un patrón aleatorio en diente de sierra en función de los componentes armónicos y de ciertos componentes heterodinios generados por algún par de frecuencias.

Esta formulación es coincidente con la enunciada por Raman [2], en virtud de la cual el mínimo de fuerza del arco requerida para mantener un movimiento estable en las cuerdas varía directamente con la velocidad del arco e inversamente con el cuadrado de la distancia desde el puente. También puede entenderse en términos del dominio del tiempo, donde el *tono del lobo* se produce como resultado de un desfase temporal entre las oscilaciones de los dos sistemas [23]. Desde este punto de vista, el *tono del lobo* puede ser controlado o mitigado si el músico presiona fuertemente la cuerda con el arco dado que de esta forma el límite del mínimo de fuerza del arco requerido no alcanzará la actual fuerza del arco sobre la cuerda.



Figura 13. Violonchelista controlando la posición del arco, la presión del arco (mínimo de fuerza del arco), velocidad del arco, presión y punto de contacto.

5. Susceptibilidad del violonchelo al *tono del lobo*

Aunque el *tono del lobo* puede emerger en cualquier instrumento de cuerda frotada, el violonchelo es más proclive a sufrirlo por varias razones: por un lado, la diferencia de impedancias entre las cuerdas y el cuerpo que se da en este instrumento, y por otro, el diseño del puente del violonchelo, más alto que el del violín o la viola. A esto hay que añadir que el diseño del violonchelo no está escalado en relación al del violín.

En relación con la primera causa, recuérdese que en las secciones 3.2 y 4.1 se discutió la influencia de la impedancia en la generación del *tono del lobo*. En el funcionamiento normal del instrumento la diferencia de impedancias de las cuerdas y el cuerpo permite que se mantengan estables las oscilaciones en la cuerda. En este sentido, a más diferencia de impedancias entre ambos sistemas, menor susceptibilidad a la generación del *tono del lobo*, ya que de esta forma se imposibilita en cierta manera el acople de los osciladores. Sin embargo, en el caso del violonchelo, la diferencia de impedancias entre los osciladores es menor dado que sus dimensiones no se han incrementado en la proporción $1/f$ [13].

Nótese, por otro lado, que los factores de resonancia del cuerpo o de impedancia de las cuerdas son dependientes del tamaño del instrumento. En este sentido, para el diseño del instrumento debe considerarse lo que se conoce como *ajuste dimensional* en el que todos sus elementos siguen el mismo patrón dependiente del tamaño. En el caso del violonchelo este ajuste no es del todo practicable, y sus cuerdas son más pesadas comparadas con las realmente escaladas con el cuerpo. Dicho de otro modo, el violonchelo es un instrumento más pequeño que el instrumento perfectamente diseñado a

escala, es decir, manteniendo las proporciones a escala del violín.

En cuanto a la segunda razón, el diseño del puente tiene también cierta influencia en el fenómeno del *lobo*. En el caso del puente del violonchelo, su diseño más alto permite una mayor oscilación en respuesta a las vibraciones de la tapa superior, lo que reduce ligeramente la impedancia que ofrece a las cuerdas [13]. Esta reducción de la impedancia ha sido estimada por Cremer [10] en un factor de 2,4. Además, el puente más alto del violonchelo contribuye a una respuesta más fuerte por parte del cuerpo a las excitaciones de las cuerdas en frecuencias cercanas a la frecuencia principal del cuerpo, dado que en esa gama de frecuencias funciona de forma análoga a una palanca. Esta respuesta puede en ocasiones desviar la frecuencia del modo fundamental de la cuerda de tal forma que imposibilite el normal establecimiento del régimen de oscilación, dando lugar al *tono del lobo* [5].

6. Controlando el *lobo*

Aunque el *tono del lobo* genera muchos problemas a los instrumentistas de arco dado que dificulta enormemente la ejecución de una nota, además del desagradable efecto que produce en el oyente, varios métodos han sido desarrollados a lo largo de varias décadas de experiencia para controlar o eliminar este imponderable. Estos métodos podemos clasificarlos en endógenos y exógenos. Los primeros hacen referencia a aquellos que son instalados en el instrumento con el propósito de controlar o eliminar el *lobo*. Los segundos se refieren a métodos aplicados por el propio instrumentista en el curso de la ejecución, con el objetivo de minimizar los efectos nocivos de este fenómeno.

6.1. Métodos endógenos

El objetivo principal de todos los supresores del *lobo* es absorber la energía de vibración de la frecuencia de resonancia donde se genera. El método más utilizado en este tipo consiste en instalar un dispositivo en el instrumento a modo de resonador con un alto coeficiente de amortiguamiento, que se conoce vulgarmente como *matalobos* o *quitatlobos*. Actualmente los más usados consisten en una pequeña masa a modo de cilindro de metal forrado con caucho en su interior que funcionan como un oscilador afinado a la misma frecuencia de resonancia del cuerpo donde se genera el *tono del lobo*, siendo muy eficientes para amortiguar el sonido del modo de resonancia del *lobo*, pero sin afectar prácticamente a las otras resonancias. El dispositivo se fija en la cuerda donde el *lobo* es más susceptible, y se sitúa en el segmento de cuerda que corre entre el puente y el cordal. El músico debe seleccionar apropiadamente la posición correcta

para que dispositivo funcione correctamente. En ocasiones, la gama de frecuencias afectadas es bastante amplia y el supresor puede ser afinado para proteger una nota u otra, en función de la susceptibilidad de cada nota. De esta forma, cuando se excita el modo de resonancia que genera el *lobo*, se fuerza a esta resonancia a vibrar únicamente en esta sección de la cuerda, y el dispositivo se encarga de amortiguar la energía excedente del cuerpo. El uso de este dispositivo no permite utilizar una sordina, ya que se sitúa en la misma cuerda donde se fija el supresor.

Un dispositivo que funciona de forma análoga es una pequeña masa de metal, de forma circular (fig. 14), que se fija también en la cuerda por debajo del puente. Este supresor, estratégicamente posicionado, añade un pequeño peso a la cuerda, que queda afinada en la región del *tono del lobo*. De esta forma, se previene la división de la frecuencia fundamental en dos frecuencias o picos (fig. 15).

Otro tipo de supresor consiste en un elemento resonador independiente que se sitúa directamente en el parte superior de la tapa superior del instrumento, o bien en su interior, justo debajo de las *efes*. Este resonador se afina en un rango de frecuencias donde el *lobo* es más susceptible funcionando como eficiente amortiguador. El dispositivo modifica la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo, lo que reduce la interacción entre las oscilaciones de la cuerda y el cuerpo. Debido a su posición, no le afectan los cambios aplicados en las cuerdas o el puente, y el músico puede hacer uso de una sordina. Sin embargo, la calidad del tono de otras resonancias puede verse afectada debido a la no selectividad del método.

El músico también puede reemplazar la cuerda más propensa a excitar el *tono del lobo* por una con un diámetro menor, modificando así las frecuencias de resonancia. De esta forma el músico también puede tocar



Figura 14. Supresor de masa ajustado a la cuerda de un violonchelo.

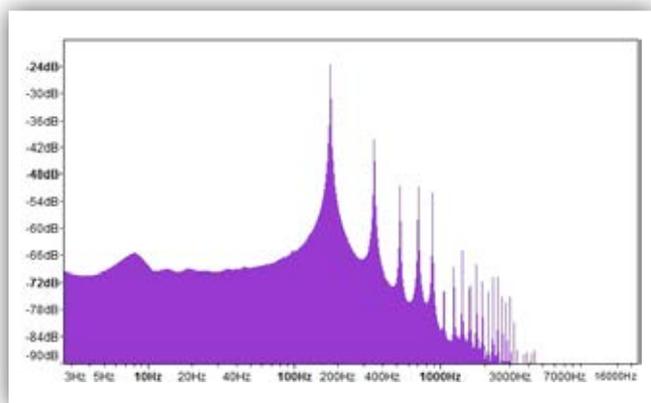


Figura 15. Espectro del *tono del lobo* (Fa₂) emitido con un supresor de masa de metal fijado en la cuerda.

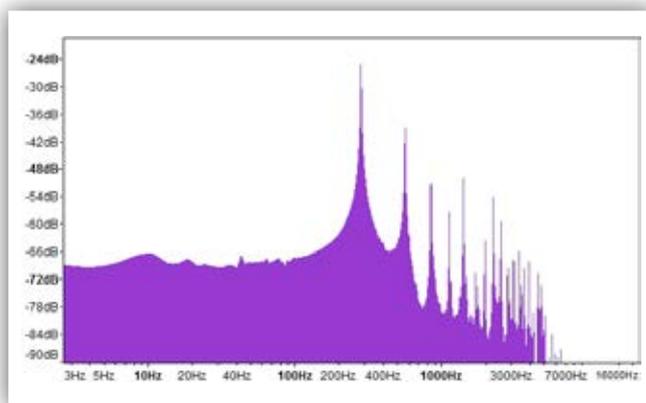


Figura 16. Espectro del Fa2 en un violonchelo aplicando todos los métodos exógenos para controlar el *lobo*.

notas de la frecuencia del *lobo* con diferentes digitaciones, reduciendo así la posibilidad de despertarlo.

6.2. Métodos exógenos

En este tipo de métodos el músico puede mitigar o controlar los efectos del *lobo* aplicando modificaciones en la técnica del instrumento, aunque conllevan otros efectos colaterales que pueden afectar a la calidad del tono. En este sentido, el instrumentista puede tratar de domesticar al *lobo* incrementando la fuerza del arco, modificando el punto de contacto del arco, ejecutando el *vibrato* o presionando con sus rodillas el cuerpo del instrumento (fig. 15).

Presionando más fuerte con el arco sobre la cuerda puede contribuir a minimizar los efectos del *lobo*, ya que de esta forma el mínimo de fuerza requerida por el arco no superará la actual fuerza del arco³. Esta operación también excita los armónicos más altos de la cuerda, que cooperan para mantener el régimen del modo fundamental.

El *vibrato* también puede reducir los efectos nocivos del *lobo* dado que ambos operan bajo principios acústicos análogos. El *vibrato* se genera de forma deliberada por el músico en aras de obtener una mayor expresividad en la ejecución, consistiendo en una oscilación periódica de la amplitud del sonido. Por su parte, el *tono del lobo* también se percibe como pulsaciones que una oscilan de forma periódica. Por consiguiente, aplicando más *vibrato* a la nota en cuestión, el músico puede enmascarar los efectos desagradables del *lobo*.

El método de presionar con las rodillas el cuerpo del instrumento es poco usado. Con este truco el músico

amortigua la vibración excedente del cuerpo del chelo y, en cierta manera, también modifica sus resonancias naturales al añadir un elemento al sistema que altera su forma.

Además de estos métodos o trucos, el músico es consciente que el *tono del lobo* puede aparecer y desaparecer con los cambios de humedad o temperatura. La velocidad del sonido es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa media molecular del aire y el aire húmedo es menos denso que el aire seco⁴, de manera que esto puede aumentar ligeramente la velocidad del sonido y, por tanto, desviar la frecuencia del *lobo* y hacerla más o menos susceptible.

Finamente, los luteriers tienen en cuenta algunas reglas básicas a la hora de construirse instrumentos, para evitar en la medida este indeseable tono. Una de ellas es utilizar placas con una madera más pesadas y rígidas. En la medida en que incrementamos la diferencia de masas entre los dos osciladores —cuerdas y cuerpo— al utilizar placas más pesadas, las impedancias de ambos también se modifican, ampliándose la diferencia de impedancias. Este principio también es aplicable al uso de cuerdas más ligeras. En ambos casos, esto tiene el efecto de minimizar los efectos del acople de los osciladores, domesticando en cierta manera el *lobo*⁵. Otra regla es no utilizar para la construcción del instrumento costados que superen los 120 mm, ya que de lo contrario se incrementa el volumen de aire del cuerpo y por tanto su resonancia natural, lo que produce una mayor amplitud de oscilación. La posición del alma también puede desviar la frecuencia de resonancia principal del cuerpo, evitando así el acople y la

³ Véase el apartado 4.2.

⁴ El peso molecular del vapor de agua es sensiblemente inferior a los pesos moleculares de los dos componentes esenciales que constituyen el medio gaseoso, esto es, nitrógeno y oxígeno.

⁵ Véase el apartado 4.1.

generación del *lobo*, aunque ello pueda ocasionar otros efectos en la calidad tonal del instrumento.

Conclusiones

En este estudio se ha procedido a caracterizar el fenómeno del *tono del lobo* estableciendo una formulación cualitativa en base a las teorías clásicas sobre el fenómeno y al análisis espectral de varias muestras sonoras. Previamente, en una primera sección se ha procedido a revisar las principales teorías acerca del fenómeno, y en la segunda sección se han analizado y discutido los fenómenos y factores implicados en la generación del *tono del lobo*. Por último, se han revisado los métodos de control de este fenómeno.

El fenómeno del *lobo* puede explicarse mediante una formulación lineal en términos de osciladores acoplados, pulsaciones e impedancia, o bien desde un punto de vista no lineal aplicando el concepto del mínimo de fuerza del arco requerida sobre la cuerda, lo que ha sido convenientemente justificado.

Ya que el *tono del lobo* depende de las influencias mutuas de las oscilaciones de la cuerda y del cuerpo mediante el acoplamiento, la generación de este fenómeno depende de la relación entre las impedancias de las ondas de la cuerda y el cuerpo. En este sentido, la generación del *tono del lobo* es más susceptible en un violonchelo, y sobreviene como resultado de una disfunción acústica por las imperfecciones en el diseño del instrumento, lo que ha sido validado con el análisis espectral. Esto es debido a que el instrumento no está debidamente escalado y las proporciones de impedancias entre las cuerdas y el cuerpo no son las adecuadas cuando se produce el enganche entre la frecuencia fundamental de la cuerda y la frecuencia de resonancia principal de cuerpo. Por esta razón, cuando se excita la resonancia principal del cuerpo, y gracias al efecto palanca del puente que reduce su impedancia, se produce un fuerte acople entre los dos sistemas oscilantes que da lugar a la división de la frecuencia fundamental de la cuerda en dos frecuencias —la de la cuerda y la del cuerpo— que compiten por el control del diapasón.

La frecuencia a la que el *tono del lobo* se excita varía entre un instrumento y otro. En este sentido, la frecuencia de la resonancia principal del cuerpo determina la región en la cual el lobo puede generarse.

Por otro lado, existe cierta controversia entre algunos autores en relación a si el *tono del lobo* se produce cuando se excita la resonancia principal del cuerpo o la del aire, lo cierto es que el segundo modo de resonancia del aire se sitúa muy próxima a la frecuencia principal de resonancia del aire, lo que contribuye a que también se

excite y se produzca una amplitud de vibración muy importante, al sumarse las respuestas de ambos modos.

Agradecimientos

El autor agradece la desinteresada y valiosa colaboración en la sección experimental del estudio del Catedrático de Composición y Profesor de Tecnologías aplicadas D. Gregorio Jiménez Payá y de las Profesoras de Violín y Violonchelo Dña. Gumersinda Campos y Dra. Mayte García Atienza, respectivamente, del Conservatorio Superior de Música «Joaquín Rodrigo» de Valencia.

Referencias bibliográficas

- [1] H.L.F. Helmholtz. *On Sensations of Tone*. Dover, New York, 1954.
- [2] C. V. Raman. On the wolf note in bowed string instruments. *Philos. Mag.*, 32:391, 1916.
- [3] J. C. Schelleng. The violin as a circuit. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 35(3):326–338, 1963.
- [4] Ian M. Firth and J. Michael Buchanan. The Wolf in the Cello. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 53, 457-463, 1973.
- [5] A. Benade. *Fundamentals of Music Acoustics*. Dover, New York, 1990.
- [6] E. Gough. The resonant response of violin g-string and the excitation of the wolf note. *Acustica*, Vol. 44, 113-123, 1980.
- [7] J. Woodhouse. On the playability of violins. Parts II: Minimum bow force and transients. *Acustica*, Vol. 78, 137-153, 1993.
- [8] M. E. McIntyre, R. T. Schumacher, and J. Woodhouse. On the oscillations of musical instruments. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 74, 1325-1345, 1983.
- [9] O. Inácio, J. Antunes, and M.C.M. Wright. Computational modelling of string-body interaction for the violin family and simulation of wolf notes. *J. Sound. Vib.*, 310:260–286, 2007.
- [10] L. Cremer. *The Physics of the Violin*. MIT Press, Cambridge, 1985.
- [11] W. Reinecke. Übertragungseigenschaften des Streichinstrumentenstegs. *Gagut Acoust. Soc. Newsletter*, Vol 19, 26-34, 1973.
- [12] E. Jansson. Acoustics for violin and guitar makers. Recuperado de: <http://www.speech.kth.se/acv-guit4/part1.pdf> 2002, 07/09/2004.

- [13] N. H. Fletcher and T. D. Rossing. *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, New York, 1998.
- [14] K.D. Marshall. Modal analysis of a violin. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 77, 695-709, 1985.
- [15] E. Jansson, I. Bork and J. Meyer. Investigation into the acoustical properties of the violin. *Acustica*, Vol. 62, 1-15, 1986.
- [16] R.E. Menzel and C.M. Hutchins. The optical proximity detector in violin testing. *Catgut Acoust. Soc. Newsletter*, Vol. 13, 30-35, 1970.
- [17] J.C. Luke. Measurement and analysis of body vibrations of a violin. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 49, 1264-1274, 1971.
- [18] K.A. Stetson and R.L. Powell. Interferometric hologram evaluation and realtime vibration analysis of diffuse objects. *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 55, 1694-1695, 1965.
- [19] E. Jansson, N.-E. Molin and H. Sundin. Resonances of a violin studied by hologram interferometry and acoustical methods. *Phys. Scripta*, Vol. 2, 243-256, 1970.
- [20] J. Alonso Moral and E. Jansson. Eigenmodes, input admittance, and the function of the violin. *Acustica*, Vol. 50, 329-337.
- [21] J. Alonso Moral. From properties of free top plates, of free back plates, and of ribs of properties of assembled violins. *Report STL-QPSR 1/1984*, 1-29. Speech Transmission Laboratory, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 1984.
- [22] C. Hutchins. The Physics of Violins, *Scientific American*, Vol. 207, 78-93, 1962.
- [23] M. E. McIntyre and J. Woodhouse. The acoustics of stringed musical instruments. *Interdisciplinary Science Reviews*, Vol. 3, 157-173, 1978. [20]



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**
e-mail: secretaria@sea-acustica.es
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA**

Apellidos: _____ Nombre: _____

Dirección para correspondencia: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Centro de trabajo: _____

Puesto de trabajo: _____

Dirección: _____

C.P.: _____ Ciudad: _____ Provincia: _____

Tel.: _____ Fax: _____ e-mail: _____

Brüel & Kjær

Líder en ensayos acústicos y de vibración

TODO DEL MISMO PROVEEDOR

Brüel & Kjær posee la gama más completa de sistemas de medida y ensayo de sonido y vibraciones

Soluciones completas para satélites, lanzadores, subsistemas y cajas de equipos

- Vibradores y controladores
- Transductores y sistemas de adquisición
- Software de análisis y procesado
- Gestión de datos e informes



from Brüel & Kjær



www.bksv.es/aerospace

BRÜEL & KJÆR IBÉRICA, S.A.

Sede Social: Teide, 5 - 28703 San Sebastián de los Reyes (Madrid) · Tel.: 91 659 08 20 · Fax: 91 659 08 24
Delegación: Gran Vía Carles III, 98 - Planta 10 (Ed. Trade - Torre Norte) · 08028 Barcelona
Tel.: 93 226 42 84 · Fax: 93 226 90 90 · www.bksv.es · e-mail: bruelkjaer@bksv.com

Inscrita en el Registro Mercantil de Madrid: Hoja 209544, Folio 209, Tomo 12977, Libro 0, Sección 8,
Inscripción 11 NIF A-08349649. Accionista único: Fairey Overseas Development Ltd.

Brüel & Kjær

creating sustainable value

EFICACIA Y EFICIENCIA GARANTIZADAS EN SUS MEDICIONES ACÚSTICAS

MEJORE LA CALIDAD DE SU TRABAJO:

- Soluciones intuitivas fáciles de utilizar
- Precisión, seguridad y confianza en la misma herramienta
- Potencia de cálculo y prestaciones de última tecnología
- Ahorro de tiempo de trabajo en la gestión de datos y resultados
- Futuro garantizado con sistemas modulares



AISLAMIENTO ACÚSTICO

Soluciones completas de medida, cálculo y presentación de informes, con tecnología que busca el máximo rendimiento en el menor tiempo posible y con el mínimo coste de trabajo

INTENSIDAD SONORA

La herramienta más intuitiva en la palma de su mano. El 2270 simplifica la vida del ingeniero consultor en medidas de potencia acústica y búsqueda de fuentes

SOFTWARE DE PREDICCIÓN Y MAPAS DE RUIDO

Predictor y Lima juntos para crear el programa más rápido y fiable junto con la simplicidad de manejo. Cómodo entorno de trabajo y todas las posibilidades de importación y exportación

En España, Brüel & Kjær Ibérica existe desde hace 40 años. Al contactar con nosotros, usted siempre trata directamente con personal propio, dedicado y formado exclusivamente para la compañía, y no con representantes, intermediarios o agentes multi-marca. Asimismo, le ofrecemos una amplia gama de monitores y servicios de gestión para conocer los niveles reales de ruido en su ciudad, industria o infraestructura conforme a normativa existente.



www.bksv.es

Brüel & Kjær Ibérica, S.A. · C/ Teide, 5 Bajo Edif. · Milenio · 28703 San Sebastián de los Reyes (Madrid)
Teléfono: +34 91 659 08 20 · Fax: +34 91 659 08 24 · www.bksv.es · bruelkjaer@bksv.com

HEADQUARTERS: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S · DK-2850 Nærum · Denmark
Telephone: +45 77 41 2000 · Fax: +45 45 80 1405 · www.bksv.com · info@bksv.com

Local representatives and service organisations worldwide

Brüel & Kjær 
creating sustainable value