



José Pedro Donoso, Francisco Guimarães y Alberto Tannús

Instituto de Física de San Carlos, Universidad de San Pablo

Thiago Corrêa de Freitas

Departamento de Física, Universidad Federal del Paraná

Deivito Bruno

Conservatorio Dramático y Musical de Tatuío, San Pablo

# La acústica del VIOLÍN

**E**l violín es considerado uno de los más refinados instrumentos de cuerda. Es una obra de arte de líneas depuradas e inspirada belleza plástica, y una invención de gran complejidad en cuanto a su acústica. Forma parte de una familia de instrumentos tradicionales, que incluye a la viola y al violoncelo. Nació en Italia a comienzos del siglo XVI, producto de la evolución de instrumentos de cuerdas frotadas, como el rabel o rebec, la viela o fídula y la viola da braccio, usados según los historiadores para ejecutar música de danza en las fiestas populares.

Los primeros violines fueron creados por integrantes de dos célebres escuelas italianas de luthería, como se denomina la fabricación de instrumentos musicales de cuerda y con caja de resonancia. Los iniciales fue-

ron creados por Andrea Amati (ca. 1505-ca. 1578) en Cremona, hacia 1560; unos años después Gasparo Bertolotti (1540-1609), conocido como Gasparo Da Salò, comenzó a producir similares en Brescia. En esta ciudad, Giovanni Maggini (1580-1630) fue más allá de Da Salò, su maestro, estableció las formas actuales del violín y construyó los primeros violoncelos. En Cremona, la dinastía de los Amati tuvo su máximo exponente en Nicola Amati (1596-1684), nieto de Andrea y maestro tanto de Andrea Guarneri (1626-1698) como de Antonio Stradivari (ca. 1644-1737), a cuyos violines se aplica el nombre de Stradivarius. Este y Bartolomeo Giuseppe del Gesù Guarneri (1698-1744), nieto de Andrea, se suelen considerar los mayores luthiers de todos los tiempos.

## ¿DE QUÉ SE TRATA?

La música de violín, que a todos deleita, se produce frotando una cuerda de acero, perlón o fibra de carbono con hebras de crin de caballo. Pero las vibraciones de la cuerda así provocadas casi no crearían sonido —y menos aún música— si aquella no estuviese sujeta a la caja del violín, una delicada artesanía de varias maderas que amplifica y transmite la energía vibratoria al aire en forma de un sonido rico en frecuencias derivadas o armónicas.

Instrumentos subsistentes de los nombrados que llegan en la actualidad al mercado alcanzan muy altos precios: en 2006 un comprador anónimo pagó 3,5 millones de dólares por un Stradivarius de 1707, rematado por la casa Christie de los Estados Unidos. En 2009 en ese país se pagó diez millones de dólares por un Guarneri del Gesù de 1741 conocido como Kochanski. El hecho de que el violín prácticamente no haya sufrido modificaciones en los últimos 250 años muestra el extraordinario nivel artístico y tecnológico alcanzado por los luthiers italianos de aquella época.

La comprensión de la acústica del violín no es sencilla; por más que se la haya estudiado, continúa constituyendo un desafío. Los físicos siempre se sintieron cautivados por el instrumento. Albert Einstein (1879-1955), hoy tal vez el físico más famoso del mundo, era violinista e integró varios grupos de música de cámara, tanto en Berlín como

en Princeton. Muchos físicos contribuyeron con sus investigaciones al conocimiento de las propiedades físicas y acústicas del instrumento, entre ellos el francés Félix Savart (1791-1841), el alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894), el norteamericano Frederick Saunders (1875-1963) y el indio Chandrasekhara V Raman (1888-1970).

## Cuerdas, arcos y sonidos

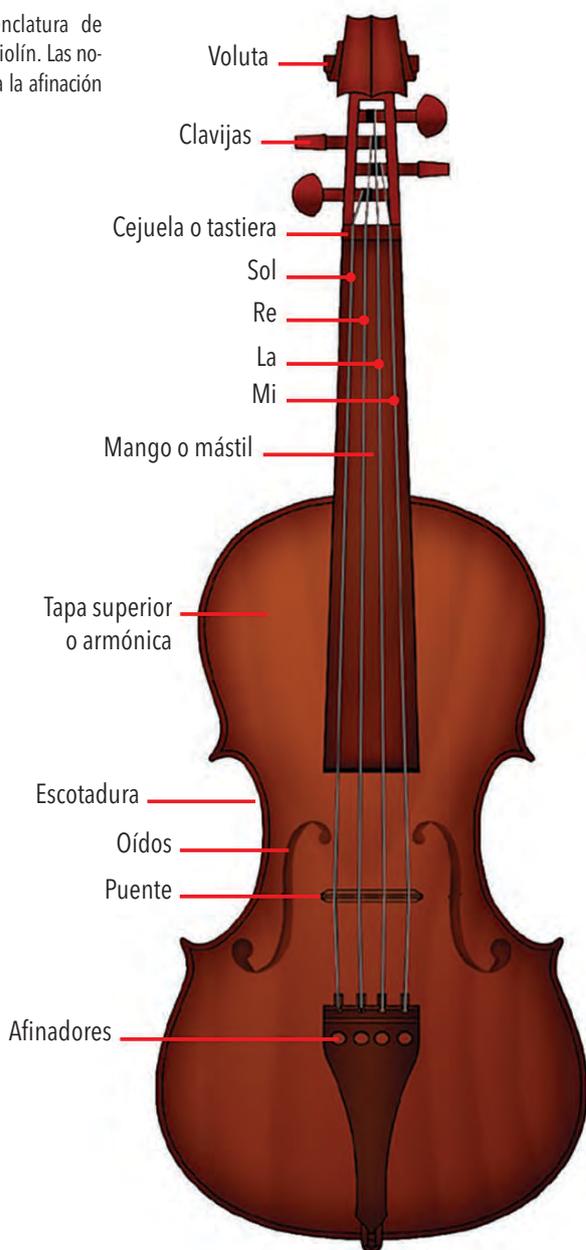
El violín tiene cuatro cuerdas tensadas sujetas sobre una caja acústica. Antes eran de tripa, pero hoy suelen ser, en la mayor parte de los casos, tanto metálicas como de perlón o de fibra de carbono, y están afinadas por quintas, es decir, en siete semitonos. Sus notas musicales, con sus respectivas frecuencias, son: sol<sub>3</sub> (196 hercios o ciclos por segundo), re<sub>4</sub> (293,66Hz), la<sub>4</sub> (440Hz) y mi<sub>5</sub> (659,26Hz). El subíndice de cada nota indica la octava a que corresponde, que es el intervalo en que la frecuencia de un sonido se duplica (así, por ejemplo, el la<sub>4</sub> tiene una frecuencia de 440Hz y el la<sub>5</sub> de 880Hz). Esas octavas conforman la escala temperada utilizada en la música actual, con subdivisiones iguales de doce semitonos en cada una.

Para afinar las cuerdas en la frecuencia de sus respectivas notas se ajusta su tensión con clavijas y, para mayor precisión, con pequeños tornillos, los afinadores. La expresividad del violín se atribuye al timbre o característica sonora del instrumento, específico para cada una de las cuerdas. Las más aguda (mi), llamada cantino, es brillante e incisiva; la segunda (la) sugiere dulzura y delicadeza; la tercera (re) tiene una sonoridad profunda, resonante y melodiosa, y la cuarta (sol) es grave e imponente.

Las cuerdas vibran al ser friccionadas por un arco, que es una larga vara de madera, suavemente curvada, en cuyos extremos están sujetas fibras de crin de cola de caballo. La forma curva del arco hace que la tensión de las crines permanezca constante cuando el intérprete las presiona contra las cuerdas, y que obtenga un sonido firme y homogéneo, que no depende de la parte del arco que apoye. Para producir la nota deseada, el violinista aprieta la cuerda, friccionada con los dedos, contra el mango o mástil del instrumento (a veces denominado diapasón). Los violinistas también pueden obtener sonidos pulsando o pellizcando (*pizzicando*) las cuerdas con los dedos, o con toques rápidos de las crines o la madera del arco.

Para confeccionar el arco, la madera ideal proviene de un árbol que crece en la selva atlántica brasileña entre Ceará y Río de Janeiro, conocido en ese país como palo brasil (*Caesalpinia echinata*). Fuera del Brasil, se lo conoce con el nombre de pernambuco brasileño o simplemente pernambuco. El lector posiblemente se sorprenda al enterarse de que el nombre portugués significa madera del color de brisas, y que fue el origen de la denominación del país. Las características de densidad, resistencia y capacidad de mantener la curvatura que exhibe la

**Figura 1.** Nomenclatura de las partes de un violín. Las notas corresponden a la afinación de cada cuerda.



madera de ese árbol están entre las más adecuadas para arcos de violines, violas, violonchelos y contrabajos. Su uso fue impuesto por el fabricante francés de arcos François Tourte (1747-1835), pero hoy el árbol ya no es abundante, al punto de que fue incluido en las listas de especies amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de la Convención sobre Comercio Internacional de Especies Amenazadas.

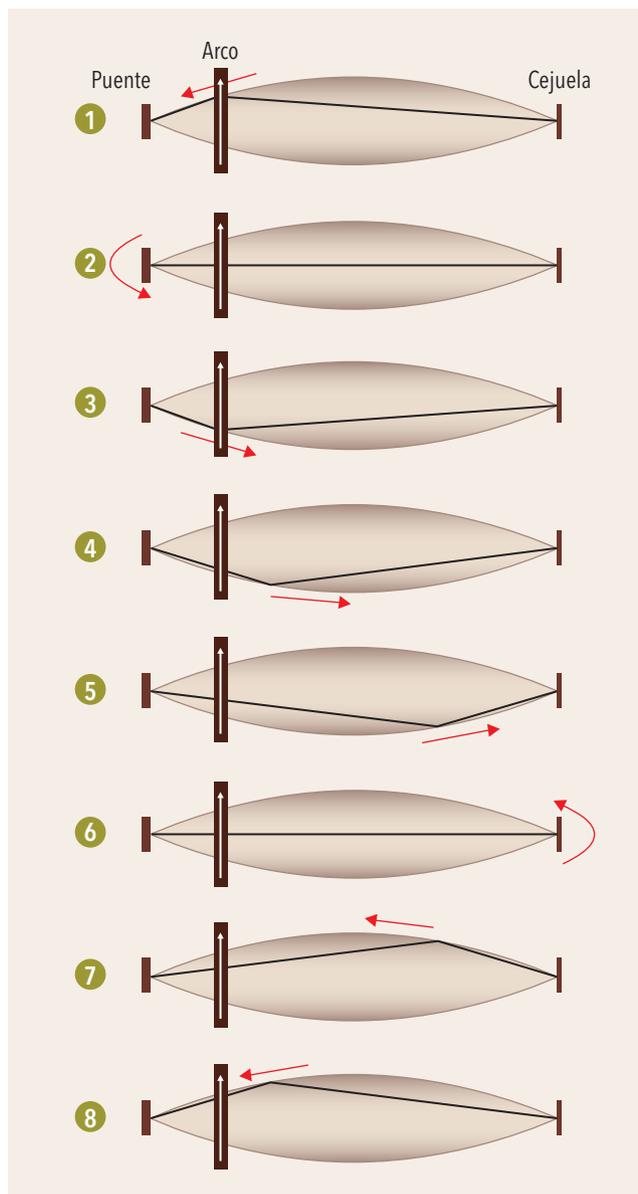
Para aumentar la fricción de las fibras del arco con las cuerdas del instrumento, las primeras se frotan regularmente con una resina de pino llamada colofonia, perrubia o pez de Castilla. Al pasar sobre una cuerda, las crines se adhieren a ella y la desplazan alrededor de un milímetro, pero la cuerda vence la fricción y se desliza por las crines para volver a su posición original. El ciclo se repite con cada nota ejecutada.

La cuerda friccionada se deforma en dos segmentos rectos unidos por un punto de inflexión, que al principio coincide con el de contacto entre las crines y la cuerda. Con el movimiento del arco, el punto de inflexión se desplaza a lo largo de la cuerda hasta su extremo, que lo refleja y hace regresar (figura 2). La gran velocidad con que sucede la deformación impide que veamos esos segmentos rectos de la cuerda y solo podamos percibir dos formas parabólicas sucesivas creadas por el movimiento del punto de inflexión.

El sonido que emite una cuerda que vibra está determinado por el tono original y por sus semitonos o armónicos, que son vibraciones de frecuencias matemáticamente relacionadas con la del tono original. La vibración de la cuerda friccionada por un arco es diferente de la de una cuerda pulsada, como la de una guitarra. Cuando se pulsa una cuerda, los semitonos generados decaen rápidamente y no son enteramente armónicos. Pero si la cuerda se fricciona con un arco, la oscilación se mantiene y la onda sonora resultante toma la forma de dientes redondeados de serrucho, compuesta por una repetición y superposición de armónicos.

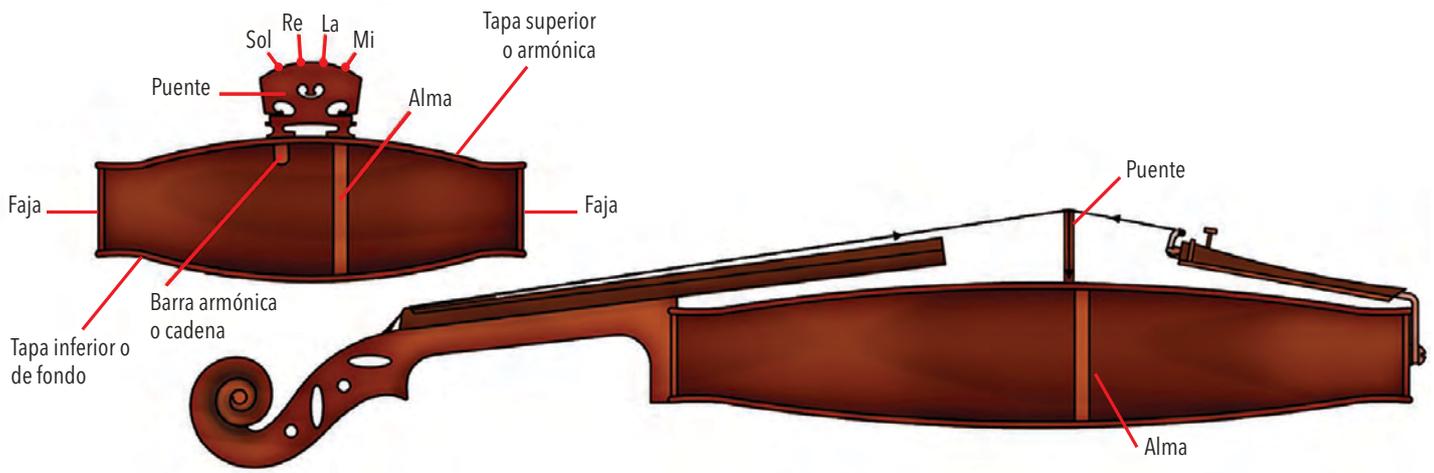
De este modo, el espectro sonoro del violín está constituido por la frecuencia de la nota ejecutada, que es la básica, más un gran número de armónicos de amplitud decreciente, cuyas frecuencias son siempre múltiplos enteros de la primera. Los espectros sonoros ricos en armónicos son muy apreciados en la música: la calidad del sonido de un instrumento está determinada por el número de armónicos presentes y sus amplitudes. De ahí la riqueza sonora del violín.

Aunque la mencionada amplitud de la oscilación de las cuerdas del violín, de cerca de un milímetro, sea considerable, el sonido que producen es muy débil. Las cuerdas son muy finas y, al vibrar, desplazan poco aire y le transfieren poca cantidad de energía sonora. En consecuencia, para que el violín se pueda usar como instrumento musical, es necesario magnificar las vibraciones de sus cuerdas mediante una caja de resonancia que cau-

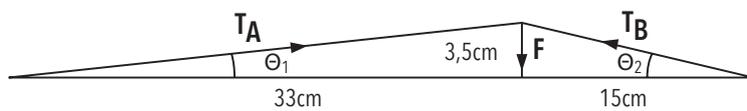


**Figura 2.** Desplazamiento de alrededor de 1mm de la cuerda de un violín al ser frotada por las crines del arco. La vibración de la cuerda hace que esta tome la forma de dos segmentos rectos separados por un punto móvil de quiebre. Las flechas indican el desplazamiento de ese punto desde el de contacto con el arco hacia el puente, luego hacia la cejuela y de retorno en dirección al puente, es decir, recorre toda la extensión de la cuerda entre sus apoyos, cada uno de los cuales lo refleja hacia el otro. La velocidad de este movimiento impide distinguir lo descrito y lleva a percibir solo dos curvas parabólicas que marcan el recorrido del punto de quiebre.

se una mayor alteración del aire y así aumente la intensidad del sonido. Esa caja es evidente en el violín y sus congéneres. En el primero mide normalmente un poco más de 35cm de largo y tiene una elegante forma ovalada, con unas contracurvas llamadas escotaduras que la estrechan en el centro. La pieza que transfiere a la caja la vibración de las cuerdas es el puente, que mantiene elevadas a estas. Las caras superior e inferior de la caja se llaman tapas o tablas: tapa armónica la superior o de las cuerdas y tapa de fondo la otra, mientras que los aros o fajas forman los cierres laterales. A veces se coloca una



**Figura 3.** Cortes transversal y longitudinal de un violín. Se puede advertir cómo las cuerdas, al ser puestas en tensión, ejercen fuerza sobre el puente, que a su vez la transmite a la tapa superior, por donde llega al alma, a los aros o fajas y a la tapa inferior, es decir, se dispersa por la caja del instrumento.



**Figura 4.** Diagrama de fuerzas que indica cómo las cuerdas tensionadas presionan sobre la tapa superior o armónica de la caja. La figura indica medidas reales de altura del puente y longitud de los tramos de cuerda de este a la cejuela y los afinadores.

mentonera (foto de portada) en la parte inferior izquierda de la tapa armónica, para evitar que el ejecutante deba recurrir a un paño sobre el que apoyar el mentón y así impedir que su transpiración afecte la madera.

## Maderas especiales

La calidad de un violín depende de las propiedades físicas de la madera utilizada en su fabricación, entre otras, su densidad, dureza, elasticidad y la velocidad con que el sonido se propaga por ella. La tapa superior y el fondo de los instrumentos de cuerda están hechos de maderas diferentes. El abeto rojo (*Picea abies*) se utiliza tradicionalmente para la primera, por su gran elasticidad, firmeza y resistencia. Para el fondo o tapa inferior como también para los aros y el mango, se emplean maderas de dos especies de arce (*Acer campestre* y *A. platanooides*), cuya densidad y rigidez son mayores que las del abeto. Esas tapas no son pasivos cierres de madera de la caja: deben comportarse como tablas armónicas, con patrones adecuados de frecuencias de vibración. Los luthiers realizan un cuidadoso trabajo de pulido de las maderas de las tapas y prueban su vibración dándoles en ciertos lugares pequeños golpes con los dedos, para poder ajustarlas hasta alcanzar el resultado esperado.

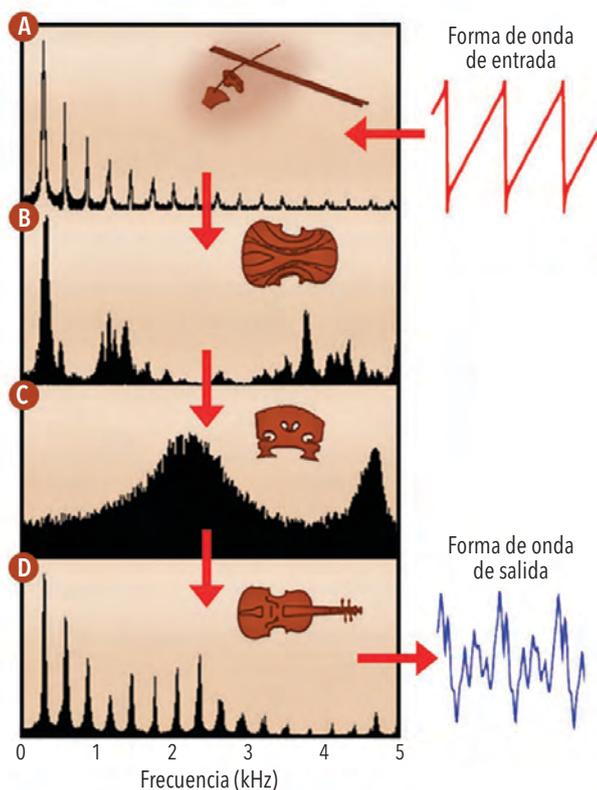
Las vibraciones de las cuerdas, transmitidas a la tapa superior por el puente, alcanzan la tapa inferior por el alma, un pequeño cilindro de madera de pino ubicado en

el interior del violín que conecta con firmeza tapa superior y fondo (figura 3). La vibración de las tapas hace que el aire dentro de la caja también vibre. La frecuencia de resonancia de la cavidad, de entre 270 y 290Hz, refuerza significativamente la sonoridad de la segunda cuerda del instrumento, que vibra con una frecuencia de 294Hz.

El puente es una pieza crucial del violín porque vincula las cuerdas con la caja del instrumento. Fabricado con maderas relativamente duras, como la del segundo de los arces mencionados o la de haya (*Fagus sylvatica*), se encuentra en la parte más flexible de la tapa superior del instrumento, la más adecuada para transmitir la vibración de las cuerdas a la caja de resonancia. El puente actúa también como filtro acústico, pues transmite mejor algunas frecuencias que otras.

En la tapa superior de la caja de resonancia de un violín se advierten dos orificios curvilíneos, dispuestos simétricamente a los lados del puente. Se llaman *oidos* y tienen forma ondulada, como una antigua letra llamada ese larga, o una estilizada efe cursiva. Además de conferir cierto elegante encanto visual al instrumento, esos orificios tienen funciones acústicas. En primer lugar, vuelven más flexible el área central de la tapa, donde se ubica el puente, lo que facilita la transmisión de la vibración de la cuerda a la caja. En segundo lugar, conectan esa caja, que es una cavidad llena de aire, con el exterior, lo que también influye en el sonido emitido.

Las cuerdas están sujetas en el extremo superior del mango a clavijas, ubicadas en el clavijero, que termina decorativamente en la voluta, una forma enrulada que a veces se reemplaza por una cabeza humana o animal. Las cuerdas pasan de las clavijas a una pieza por lo común de ébano llamada cejuela o tastiera, de allí al puente, que tiene ranuras específicas para cada una, y de este a los afinadores. Por su disposición, hacen una fuerza considerable sobre la superficie de la tapa; mediante un diagrama que tome en cuenta la tensión de las cuerdas (que en conjun-



**Figura 5.** El sonido de un violín se produce en varios pasos. El arco hace vibrar las cuerdas y genera una onda con forma de dientes de serrucho y un espectro sonoro rico en armónicos (A). Las vibraciones y resonancias del cuerpo del instrumento (B) y del puente (C) refuerzan un determinado número de esos armónicos. El resultado de todas estas resonancias es un sonido rico en componentes de distintas intensidades (D). La onda de salida dibujada se obtuvo tocando la nota re.

to transmiten longitudinalmente una fuerza de entre 25 y 30kg), el ángulo que ellas forman con la tapa y la altura del puente (figuras 3 y 4), se puede calcular que esa presión que transmite el puente a la tapa es equivalente al peso de un cuerpo de nueve kilogramos. La forma arqueada de la tapa ayuda distribuir esa carga y evita que con el tiempo produzca deformaciones de la madera.

Además, el instrumento tiene en su interior una pequeña vara llamada barra armónica o cadena, adherida a la superficie interna de la tapa debajo del puente y del lado de las cuerdas más graves. Es de madera de abeto y se coloca en el mismo sentido que las cuerdas. Tiene una función acústica, especialmente en la ampliación de los sonidos graves, y una función estructural: como soporte mecánico del cuerpo del instrumento ayuda a resistir la fuerza ejercida por las cuerdas sobre el puente.

El alma del violín se coloca debajo del puente del lado de las cuerdas más agudas. Su nombre expresa su importancia: pequeñas alteraciones de su posición o su forma alteran significativamente el timbre o la sonoridad del instrumento. El alma altera el modo de vibración de ambas tapas y funciona como el punto de apoyo de una palanca, pues imprime un leve balanceo al puente que se adiciona a la vibración de las tapas.

Así como los sonidos graves son transmitidos por altoparlantes grandes, que desplazan gran cantidad de aire, el movimiento de mayor amplitud de la tapa superior del violín en el área de las cuerdas más graves también desplaza más aire que su movimiento del lado de las cuerdas más agudas, cuya amplitud, además, está limitada por el alma. El resultado es una mayor propagación sonora general y, además, una intensidad más equilibrada del sonido, ya que la de las cuerdas más graves se vuelve comparable con la de la cuerda más aguda. Simétrico en su apariencia externa, las propiedades acústicas del violín están fuertemente influenciadas por la asimetría física y acústica de alma y barra armónica, dos elementos ocultos en su interior.

## Riqueza armónica

A la luz de las explicaciones anteriores, se puede tener una comprensión global de cómo se produce el sonido del violín. Las cuerdas friccionadas oscilan por más tiempo que las punzadas; producen un sonido básico y otros complementarios, con una onda sonora resultante que se caracteriza por un espectro rico en armónicos, lo cual es muy apreciado en música por la plenitud y riqueza auditiva que se percibe (figura 5). En el violín y sus congéneres, el sonido inicial resulta modificado por las vibraciones que provoca en el puente y la caja del instrumento, en especial las tapas y el aire en el interior de esa caja. Ello refuerza y amplifica los componentes del sonido, en particular aquellos armónicos cuyas frecuencias coinciden con las de los modos normales de vibración de esos cuerpos, y en consecuencia, aparecen resonancias múltiples. Comprender todos los aspectos de la extraordinaria sonoridad del violín es un desafío no carente de misterios, aun en nuestros días. Vale la pena empeñarse por despejarlos. **CH**

Este artículo fue publicado en portugués en *Ciência Hoje* (45, 267: 20-25, enero-febrero de 2010). Su texto fue traducido y adaptado por CIENCIA HOY con la valiosa ayuda de Pablo Saraví, que los editores agradecen. Los autores Donoso y Bruno integran la orquesta experimental de la Universidad Federal de San Carlos.

### LECTURAS SUGERIDAS

CREMER L, 1984, *The Physics of the Violin*, MIT Press.

DONOSO JP et al., 2008, 'A física do violino', *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30, 2, 2305:1-21, accesible (diciembre de 2010) en <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v30n2/a06v30n2.pdf>.

FLETCHER NH & ROSSING TD, 2005, *The Physics of Musical Instruments*, Springer, Nueva York.

NELSON SM, 2003, *The Violin and Viola*, Dover Publications, Nueva York.