

# FÍSICA DE LOS INSTRUMENTOS DE CUERDA

*Un instrumento de música debe permitir la transmisión de un mensaje musical con toda la riqueza posible. Para eso debe estar bien construido, según reglas empíricas con siglos de tradición. Aunque la física ayuda a comprender algunas de estas reglas, hay detalles complejos que debe resolver empíricamente el constructor.*

**Javier Luzuriaga**

En algunos campos de la tecnología, los avances son enormes. Por ejemplo en computación estamos acostumbrados a que una máquina sea obsoleta al cabo del año, y después de cinco, sea casi inservible. Sin embargo, no es así para todo. Los violines Stradivarius, fabricados hace más de doscientos años, valen fortunas y son buscados por los mejores violinistas. ¿A qué se debe esto?

En verdad, no hay una respuesta simple, y no es la intención develar el "secreto de Stradivarius", que de todos modos no existe. Pero para entender la complejidad del problema, es útil referirse a algunos aspectos que hacen a la física de los instrumentos de cuerda.

## Música y Física

Los músicos y los físicos tienen actitudes, y usan un lenguaje, diferente a la hora de describir los sonidos.

En general los músicos (y los oyentes) están más interesados en el mensaje musical que en el medio que produce o transmite ese mensaje. Al revés de los físicos, que nos ocupamos de cómo se producen esas vibraciones del aire que llamamos sonido.

Toda pieza musical transmite un mensaje, tenga palabras o no, y como oyentes nos puede interesar más o

menos la gramática de ese mensaje, es decir la armonía, la melodía o el ritmo. Estos elementos son importantes para el compositor. El funcionamiento de un instrumento, en cambio, no entra dentro del campo de su interés, o entra sólo en la medida en que las características sonoras del instrumento le dan una cierta expresividad. Los elementos como expresividad, mensaje y el placer que da la música son subjetivos, claro.

En cambio el físico está más interesado en cómo se produce el sonido, al margen de la subjetividad, que es ajena a la física, cuya fortaleza es lo objetivo. En cierta medida es como si estuviéramos interesados en el alfabeto, la tinta, el papel y el tipo de letra con que están escritas estas páginas. Y que no nos importe si lo que estamos escribiendo con estos caracteres es sensato, aburrido o delirante.

Sin embargo, para el constructor de instrumentos musicales, ambas componentes son importantes. Por un lado, tiene que entender muy bien cómo se producen los sonidos físicamente y las limitaciones inherentes a la física, y por otro, tiene que saber muy bien qué sonidos le interesan a los músicos, y producir un aparato que exprese con la mayor facilidad y versatilidad posibles los mensajes musicales que se le pidan.

## Diferencias de lenguaje entre músicos y físicos

Los músicos suelen hablar de la altura, intensidad y timbre de las notas musicales, aunque para los físicos es más común referirse a la frecuencia, potencia y descomposición en frecuencias de los sonidos. Altura, intensidad y timbre son definidas más bien como sensaciones subjetivas, mientras que lo que los aparatos pueden medir son la frecuencia, la potencia o la descomposición en frecuencias. Sin embargo, ambas cosas están relacionadas.

## Altura

La altura tiene que ver sobre todo con la frecuencia de vibración de un sonido. Y nos indica cuán aguda o grave es la nota que suena. Lo que percibimos como sonido es en realidad el resultado de perturbaciones en el aire que llegan a nuestro oído. Estas perturbaciones son pequeñas variaciones de presión, más o menos periódicas, que se propagan por el aire como

**Palabras clave:** Sonido, vibraciones, acústica, física.

### Javier Luzuriaga

Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro, luzuriag@cab.cnea.gov.ar

Licenciado y Doctor en Física (Instituto Balseiro, 1974, 1979). Es investigador del Laboratorio de Bajas Temperaturas del Centro Atómico Bariloche, y Profesor Asociado en el Instituto Balseiro. Su tema de investigación es el estudio experimental de materiales a bajas temperaturas, en particular los fenómenos de superconductividad y superfluidéz.

Su interés por la física de instrumentos musicales surgió a partir de largas charlas con el luthier de Bariloche Raúl Pérez y los llevó a dictar un taller sobre Física de Instrumentos Musicales en la Reunión de Enseñanza de la Física, (Bariloche, 1989), y finalmente a escribir el libro Física de los Instrumentos Musicales publicado por Eudeba en 2006.



**Fig. 1. Diferentes formas de cajas para instrumentos a cuerdas. A la derecha se ve un laúd, en el centro varios ejemplos de la familia de las guitarras antiguas, a la izquierda un arpa.**

ondas sonoras. Es decir, la presión aumenta y disminuye repetidamente y eso lo sentimos como un sonido. Si la repetición es rápida, (la frecuencia es alta) el sonido es agudo, si es lenta (baja frecuencia) el sonido es grave. No todas las variaciones se perciben como sonido. Si la frecuencia es muy baja (menos de 16 vibraciones por segundo) no se oye, y si es muy alta (mayor de 20.000 vibraciones por segundo) tampoco. Estos son los valores extremos, hay bastante variación de persona a persona, y en particular la facultad de oír sonidos muy agudos disminuye con la edad. Los perros y los murciélagos tienen un oído mucho mejor que el nuestro para las frecuencias altas (los llamados ultrasonidos).

Por razones relativamente misteriosas, la música no usa todas las frecuencias posibles. Las notas musicales van de a saltos, sin usar frecuencias intermedias, en una escala musical. Esto es común a muchas culturas, aunque las escalas difieran entre sí. En la música occidental actual, se define el La 440 como frecuencia de referencia. Este es un sonido que vibra 440 veces por segundo, y hay reglas que definen escalas musicales a partir de esta frecuencia. Si alguien quiere oír como suena, puede descolgar un teléfono. El tono de línea libre de los teléfonos fijos, es justamente de 440 ciclos por segundo.

### **Intensidad**

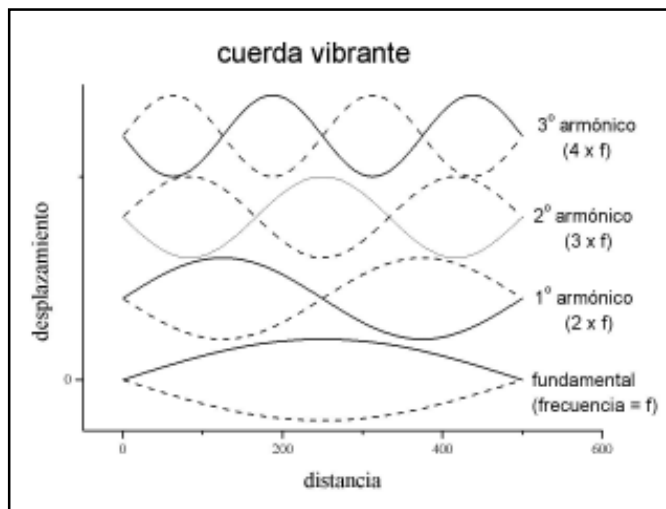
Otra característica del sonido es la intensidad, que está ligada a la potencia, o energía por unidad de tiempo. Es fácil ver que para gritar usamos más energía que para susurrar, y no es necesario explicar mucho qué entendemos por un sonido fuerte o suave. Las variaciones de intensidad son importantes a la hora de transmitir el mensaje musical, y también para atrapar la atención del oyente. Si el volumen es constante, es más aburrido. Como curiosidad, es común en la música "de ascensor" o "de supermercado", mantener el volumen igual siempre, para no distraer demasiado al oyente, que de todas maneras está prestando atención en otra cosa (y muy bien que hace...).

### **Timbre**

La tercera propiedad, el timbre, es la más difícil de explicar. Tratemos de imaginar un ejemplo. Si escuchamos la misma nota musical, pero tocada por una guitarra y una flauta, no nos va a costar mucho saber que instrumento toca una u otra. Aunque la nota (frecuencia principal) sea igual, y nos hayamos esforzado para tocar con el mismo volumen, hay diferencias. Se puede pensar que la nota o frecuencia fundamental, viene acompañada por otras vibraciones, de menos intensidad y en general múltiplos de la principal, y que estas frecuencias que "acompañan" son esenciales para definir el timbre. Las frecuencias que acompañan dependen mucho de la física de cada instrumento, y por eso suenan tan distintas la flauta y la guitarra. Aunque hay otro elemento que es crucial también. Este es la manera en que crece, se sostiene y decae el sonido. En la guitarra pulsamos la cuerda, el sonido crece de golpe, y después tiene una duración de pocos segundos (a lo sumo) donde va decayendo constantemente. En cambio en la flauta, la vibración se mantiene constante todo el tiempo que el ejecutante sea capaz de soplar, y después cae muy de golpe. Esto nos da una sensación muy diferente, y se usa como recurso expresivo también. El violín, por ejemplo, se frota normalmente con el arco, y por lo tanto el volumen de cada nota es relativamente continuo. El arco le entrega energía a la cuerda todo el tiempo (como el soplido del flautista a la flauta) y por lo tanto la nota puede ser mantenida pareja un tiempo largo. Sin embargo la partitura a veces pide el pizzicato, que no es otra cosa que pulsar con el dedo, como en la guitarra. Ahí el violín suena más como guitarra, ya que se entrega energía una vez, al pulsar, y luego la energía se va perdiendo al sonar la cuerda, disminuyendo el volumen en poco tiempo.

El timbre por lo tanto, es más difícil de definir en física, ya que la sensación subjetiva depende tanto de la cantidad e intensidad de frecuencias que acompañan a la principal, y del tiempo y la manera en que crece, se mantiene y decae la vibración. Es más fácil estudiar frecuencias puras, únicas, que la superposición a veces cambiante que producen los instrumentos reales.

Para hacer un instrumento de música, hay que producir una vibración de frecuencia definida, que va a



**Fig.2 Modos normales con los que vibra una cuerda. Se muestran los cuatro primeros, pero hay más, y cuando se pulsa la cuerda, vibran varios a la vez. Cada modo va a tener una amplitud diferente, que depende de cómo se pulse la cuerda. Pulsando al centro se da más amplitud relativa al fundamental, y pulsando en los extremos se enfatiza un poco más los modos más agudos. Nuestro oído identifica al modo fundamental cómo la nota, y los demás influyen en el timbre. El timbre final que produce el instrumento depende también fuertemente de la construcción de la caja.**

ser oída como una nota musical, que tenga un volumen apropiado y un timbre agradable.

Entonces, el primer elemento necesario para construir un instrumento musical, es tener algo que vibre. Luego hay que hacer vibrar el aire, para producir el sonido que va a llegar al oyente.

**Instrumentos a cuerda**

Un elemento vibrante que se usa mucho, es una cuerda tensa. Es el mecanismo que usan una familia muy grande de instrumentos musicales, llamados justamente de cuerda (un nombre más preciso sería cordófonos, o instrumentos a cuerda, ya que están hechos principalmente de madera, no de cuerdas...)

Una cuerda tensa es lo que se conoce en física como un oscilador.

En general, un oscilador, conceptualmente hablando, tiene que tener dos elementos principales. El primero es la llamada fuerza de restitución: la cuerda, sin perturbación está en equilibrio, derecha y tranquila, aunque está tensionada. Luego llega el dedo del guitarrista, y la aparta de ese equilibrio, pero la tensión de la cuerda, o sea la fuerza de restitución, se opone. Al principio suavemente, pero luego con mayor firmeza. Más fuerte, a medida que se aparta más. Si ahora el hombre saca traicioneramente el dedo, la fuerza de restitución se encuentra sin oponente, y la cuerda se mueve, cada vez más velozmente, hacia el punto de equilibrio. En el equilibrio ya no hay fuerzas, y todo debería quedar tranquilo, pero no es así. Aquí interviene el segundo elemento, la inercia. Si bien no hay fuerza de restitución en el punto de equilibrio, la cuerda se está moviendo, y al tener inercia, se quiere seguir mo-

viendo. Recordemos que la inercia no es sólo la oposición a ser movidos (como algunos de nuestros conocidos) sino la tendencia a mantener el movimiento una vez adquirido. Por eso es difícil frenar un camión. Y aunque la cuerda no pese lo que un camión, igual va a seguir de largo en el punto de equilibrio, por inercia. Y una vez que está fuera del punto de equilibrio, de nuevo actúa la fuerza de restitución, aunque ahora para el otro lado. Así la cosa no pararía nunca, y si esto fuera todo, el movimiento sería eterno. Lo que sucede es que no tuvimos en cuenta otras fuerzas, como las de fricción, o la energía sonora que se transmite al aire, y por eso, el movimiento de ida y vuelta termina por detenerse. Pero hay un número suficiente de vibraciones



**Fig. 3. Tapa y fondo de guitarra clásica. La vibración de la cuerda mueve la tapa, y la tapa mueve el aire para producir el sonido, por eso las propiedades de vibración de la tapa son fundamentales. El fondo interviene en menor medida, y por lo general es de una madera más densa.**

como para producir un sonido, que nuestro oído puede detectar.

La frecuencia con que va y viene la cuerda en su recorrido, depende de los valores que tengan la inercia y la fuerza de restitución. Si la fuerza de restitución crece, las cosas se mueven más rápido, y por lo tanto aumenta la frecuencia. Todo guitarrista sabe que para afinar una cuerda que suena bajo, hay que aumentar la tensión. Mayor tensión da mayor fuerza de restitución, aumenta la frecuencia, y la nota "sube". Si aflojamos, la nota baja. Y la inercia mueve las cosas para el otro lado. Una cuerda con más inercia, se mueve más despacio. Y esto se puede observar en la guitarra. Las cuerdas más graves tienen un "entorchado", es decir un alambre metálico enrollado alrededor. Este no aumenta la rigidez (que sería más fuerza de restitución) sino que está colocado de manera de aumentar la masa, para que la cuerda se mueva lenta y produzca una nota de menor frecuencia, más grave.

### Frecuencia de la cuerda vibrante

De manera que estas consideraciones físicas nos dicen cómo va a vibrar la cuerda, y hasta es posible deducir una fórmula para la frecuencia resultante. La frecuencia es

$$f = \frac{1}{(2L)} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Donde  $f$  es la frecuencia,  $\mu$  es la masa por unidad de longitud,  $T$  es la tensión y  $L$  la longitud vibrante total.

El hecho de que la longitud esté presente en la fórmula es importante para el ejecutante del instrumento. En efecto, es muy difícil cambiar la tensión en el medio de un concierto, y más difícil todavía cambiar la masa de la cuerda. Pero la longitud vibrante se puede cambiar, como hacen los guitarristas, "pisando" la cuerda con el dedo y variando la longitud libre, vibrante, de la cuerda. Por ejemplo, si la longitud de la cuerda es la mitad, la frecuencia de vibración es el doble. Muchos cordófonos se tocan así, aunque otros, como el piano tienen una (o varias) cuerdas para cada nota.

La cuerda puede vibrar de diferentes maneras. Hay una frecuencia fundamental, y varias frecuencias superiores llamadas armónicos. Las maneras de vibrar se muestran en la Figura 2. Al ser la cuerda flexible, puede vibrar con distintas formas. Y cada una de estas formas tiene una frecuencia propia, diferente de las otras, pero que están relacionadas de manera simple. Las frecuencias son múltiplos de la fundamental, es decir el doble, el triple, el cuádruple, y así sucesivamente. Desde Pitágoras, esto es llamado una serie armónica.

Si pulsamos la cuerda de una guitarra, se superponen varias de estas maneras de vibrar, pero nuestro oído identifica al tono fundamental (el de menor frecuencia) como "la nota", y los demás modos influyen en el timbre. Y así se pueden producir diferentes timbres. Si pulsamos en el centro de la cuerda, o en un extremo, se puede oír una diferencia. El sonido pulsando en el extremo parece más "metálico" o brillante, ya que así se excitan más los modos más agudos, y pulsando en el centro la nota es más pura, porque se excita principalmente el modo fundamental. Los intérpretes usan esto para cambiar ligeramente el carácter de lo que están tocando, pulsando más cerca o más lejos del centro, o pulsando de diferentes maneras. En guitarra clásica se pulsa con la yema del dedo o con la uña buscando variedad y expresividad, y físicamente lo que ayuda para eso es la diferente composición armónica de la vibración de la cuerda que se produce de esta manera.

### Tapa, fondo, caja de resonancia (como lo ve un físico)

La cuerda vibra, pero el sonido es una vibración del aire, y como la superficie de la cuerda es poca, al moverse mueve muy poco aire. Si tomamos sólo una cuerda tensa (como podría ser en un arco de arquería) y la hacemos vibrar, hay que poner el oído cerca para oír algo. El sonido es muy débil. Entonces, si queremos más sonido, hay que agregar una caja de resonancia. Para eso están la caja, y sobre todo la tapa de las guitarras, violines, laúdes y afines (Ver Figuras 1 y 3). El piano tiene también una tabla armónica, dentro del instrumento. La idea es que la vibración de la cuerda se transmite a la tapa, que a su vez hace vibrar toda la caja, el aire de interior y en realidad todo el cuerpo del instrumento. Así se mueve mucho más el aire, y el sonido tiene mucho más volumen.



**Fig.4 Violines de distintas épocas. De izquierda a derecha, rabec, violín barroco y violín moderno (los dos últimos en proceso de fabricación).**

Hay muchas formas de vibración de un sólido elástico, como son las tapas y cuerpos de los instrumentos de cuerda. De manera que ahora, los armónicos son muchos más que en el caso más simple de la cuerda. Y en verdad no son estrictamente armónicos, en el sentido que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, pero la idea es similar y los llamaré armónicos por conveniencia. De cualquier forma, esta vibración es siempre empujada por la cuerda, o sea que sigue prevaleciendo el modo fundamental, y la nota que oímos es la de la cuerda, aunque modificada por los armónicos de la tapa, cuerpo, etc. Y estas formas de vibrar, por supuesto modifican también el timbre. Y afectan también la sonoridad general del instrumento, porque si disipan demasiada energía en su vibración, el sonido saldrá más apagado.

En la tapa y la caja está la diferencia entre un instrumento bueno y uno mediocre. Los modos de vibración cambian mucho según la madera que se use, la forma de los distintos elementos, el espesor de las maderas, el tamaño y posición de los agujeros, el barniz y muchas otras cosas. Así cambia el timbre de manera fundamental.

En el violín, por ejemplo, durante la construcción del instrumento se "afina" la tapa. El constructor sujeta la tapa en un punto, y golpea con el dedo en otro, y escucha la nota que suena. Ya sabe que sujetando en ese punto y golpeando donde se debe, excita un modo determinado, y le interesa la frecuencia de ese modo. Si no está afinado, debe sacar material de aquí y de allá para encontrar la afinación correcta. Y luego repetir la afinación en otros puntos, correspondiendo a otros modos normales. Después se hace algo similar con el fondo, se arma el violín y se lo escucha con cuidado. Según físicos que estudiaron el problema, es casi imposible predecir el sonido del conjunto a partir de la vibración de tapa y fondo, porque la vibración resultante es muy compleja. Y para complicar todo, el violín lleva un palito que conecta la vibración de tapa y fondo. Se llama justamente el alma del violín, porque hay que buscar con mucho cuidado su colocación. Un movimiento de milímetros de esta pieza, que se coloca con leve presión una vez armado el instrumento, puede arruinar o mejorar infinitamente su sonido. Entonces, durante la construcción, es normal armar y desarmar el violín muchas veces, y hacer los retoques necesarios.

### ¿Instrumentos en serie?

Una vez encontrada la forma óptima, ¿no se puede repetir exactamente, usando una computadora y una cortadora láser de ciencia ficción?

La respuesta es NO.

Lo que sucede es que las maderas nunca son iguales. Cada árbol es distinto, las vetas de la madera también, según la luz, lluvia, etc. que recibió el árbol a lo

largo de su vida. Por eso hay que trabajar individualmente cada violín, y mucho depende de la habilidad, sensibilidad y pericia del luthier. Stradivarius, Guarnerius, y los luthiers de Cremona en esa época disponían de buenos materiales, una larga tradición, un grupo de colegas con los que competir y aprender, y un innegable talento natural. Es posible que ahí estuviera el secreto de Stradivarius si es que había alguno. En la Figura 4 se ven formas de violines de distintas épocas.

De manera que la física no puede dar una respuesta a la construcción de violines. Aparte de los factores subjetivos, que no son dominio de la física pero pueden ser más importantes que ninguno, la propia física de los cordófonos es complicada. Los materiales son complejos y no son reproducibles, las vibraciones no son simples, y la evaluación es finalmente subjetiva. Aparentemente, una de las dificultades a la hora de hacer pruebas físicas de los Stradivarius que andan por ahí, es que los dueños no los prestan, presumiblemente para que no se dañe el precioso instrumento, pero también para preservar su valor de mercado. Si los tests dicen que son iguales a un violín moderno, ¿cómo lo vendo después?

La construcción de violines, entonces, es más un arte que una ciencia. El problema es más complejo que la mayoría de los que estudia la física, que siempre funciona mejor si el problema es simple y cuantificable.

## Lecturas sugeridas

### Sitios de Internet recomendados:

<http://museovirtual.csic.es/salas/acustica/sonido2/fi2.htm>  
En castellano. Algunos experimentos sencillos, explicaciones razonables.

[www.phys.unsw.edu.au/music/violin/](http://www.phys.unsw.edu.au/music/violin/)  
Física de violines y cordófonos. En inglés, sitio de un grupo sueco de física de instrumentos. Ver FAQ (frequently asked questions) para la opinión de especialistas sobre el secreto de Stradivarius.

<http://physicsweb.org/articles/world/13/4/8/1>  
Física de violines. En inglés. Artículo de revista Physics World. Tiene buenas explicaciones y datos sobre cómo funciona el mecanismo de excitación del violín con el arco.

### Libros:

J. Luzuriaga y R.O. Pérez, 2006. Física de Instrumentos Musicales. Eudeba.  
J.G. Roederer, 1997. Física y Psicofísica de la Música. Ricordi Americana S.A.E.C.