Los sonidos raros del violonchelo

Arturo Daniel García Vesga
Alumno del Grado en Física. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid

Los instrumentos de cuerda tienen, a ojos de muchos de nosotros, un sonido muy agradable. Sin embargo su sonido a veces tiene fallos, que si bien no los apreciamos en ciertos casos, están ahí, y tarde o temprano acaban apareciendo. Vamos a "asomarnos" un poco al sonido de un violonchelo, descubriremos que no es exactamente lo que esperábamos.

Introducción

Hoy en día tenemos mucha información sobre la música, el porqué, su filosofía, métodos de composición e interpretación, etc. También conocemos de manera bastante profunda los mecanismos físicos que la producen y por los cuales el sonido se transmite a nosotros, sin embargo, a la hora de llevar la música al ámbito electrónico, los métodos que usamos para reproducir y transmitir los sonidos (por ejemplo, en la radio se usa la modificación de la frecuencia o amplitud de la onda) son métodos de simplificación de la onda para poder transmitirla y almacenarla de manera más económica (como hace el formato mp3), en estas simplificaciones, muchos efectos analógicos se pierden. Por ello, aquí presentamos un estudio sobre la forma de onda estricta de la vibración libre de una cuerda de violonchelo. Este será un ejemplo más del gran potencial que tiene la transformada de Fourier para estudiar sistemas vibrantes.

Los sonidos más relacionados

Para comenzar, daremos unas pinceladas a la producción de sonido en el violonchelo. Como estamos estudiando la vibración de una cuerda libre; es decir, sin nada que fuerce su vibración, la técnica empleada para obtener la muestra a analizar será el llamado pizzicato, que consiste en pulsar la cuerda del instrumento, como en una guitarra. Este tipo de producción de sonido en los instrumentos de cuerda frotada es la más relacionada con el instrumento en sí, pues su evolución en el tiempo depende únicamente de la arquitectura del mismo instrumento y, claro está, del ambiente donde se genere, pero no de la manera de producción, como le ocurre al arco frotado; podemos decir que un violonchelista, con cuidado, puede hacer que un violonchelo suene a violín, si toca con el arco.

Debe quedar claro que en los instrumentos musicales, el sonido no sólo es producido por el cuerpo vibrante, en este caso la cuerda; intervienen otros muchos factores, también vibrantes, que conforman el sonido, como son, en el caso del violonchelo la caja de resonancia (que junto con el aire de su interior se comporta como un resonador Helmholtz), la pica, que en contacto con el suelo transmite parte de la vibración al mismo y el entorno en el que se produzca el sonido. Así, la onda que vamos a estudiar es la síntesis de todos estos factores en una sola onda que recoge un micrófono.

¡Que viene el lobo!

Los instrumentos de cuerda tienen unas características en su producción del sonido, por su forma y su manera de vibrar, que les proporcionan un timbre muy especial. Sin embargo, por los mismos motivos aparecen fenómenos menos deseables que muchas veces pueden llegar a estropear el sonido, como es el llamado lobo.

El lobo es un efecto de amplificación de frecuencias que tiene el cello. Por su propia arquitectura y demás factores de los que hemos hablado, se amplifican ciertas frecuencias fijas más de lo debido. Esto en principio no debería ser ninguna molestia, sin embargo debemos tener en cuenta que el sonido es el compendio de muchas vibraciones. Al producir un sonido con el instrumento, una parte muy relevante de las frecuencias que lo conforman viene dada por la vibración de cierta frecuencia de la cuerda. Pero como hemos dicho, la cuerda no está sola, y al vibrar junto a otros elementos, la composición final de frecuencias del sonido es la que determinan todos estos elementos. Aquí surge el problema, si tenemos muchos elementos vibrando a la vez, querremos que todos vibren con frecuencias al menos relacionadas

Revista de Ciencias, 3, 33-37, noviembre 2013
ISSN: 2255-5943

de una manera más o menos simple, musicalmente hablando, para que el resultado sea fácil de escuchar.

Es en este momento cuando el lobo entra en escena, ciertos elementos relacionados con la caja, al vibrar, fomentan siempre la misma frecuencia, con lo que si estamos produciendo un sonido que tenga una frecuencia que no esté relacionada de manera simple con la frecuencia que se fomenta (llamémosla “mala”), el resultado será desagradable musicalmente hablando. En concreto, si la frecuencia producida es cercana a la mala, el resultado serán unos batidos en la intensidad del sonido; lo que aquí ocurre lo podemos ver desde un punto de vista puramente matemático, pues sabemos que cuando sumamos, por ejemplo, dos cosenos de frecuencias cercanas, el resultado son unos pulsos en la amplitud que tienen una frecuencia que es igual a: (Freq2–Freq1)/2

Obteniendo las muestras

Así, parece interesante, no sólo estudiar un sonido producido mediante el pizzicato, pues, gracias a numerosos estudios, sabemos que lo que obtendremos será una "columna" de armónicos, relacionados entre sí mediante múltiplos enteros, respecto a la frecuencia fundamental, de acuerdo con el teorema de Fourier. Vamos entonces a observar una muestra de sonido producida cerca del lobo, con el fin de cuantificar los efectos anómalos que puedan darse en esta columna de armónicos.

Para hacer la grabación usamos un micrófono de 96 kHz de frecuencia de muestreo, para tener una buena resolución, situado a 10 cm del violonchelo a la altura del puente. Para la grabación y el tratamiento de los sonidos brutos usaremos el programa de edición musical Cool Edit®, y para el estudio de la onda, el programa matemático Matlab®.

El pizzicato lo vamos a producir pulsando un punto situado en la mitad de la cuerda Re del violonchelo (que proporciona la nota re 2), con el fin de que la onda producida fuera lo más pura posible, pues si producimos el sonido pulsando un punto situado en la parte de debajo de la cuerda, aparece una diferencia en el tiempo en que refleja la onda en los extremos que introduce una periodicidad a mayores que hace más complejo el sonido, aunque se comprueba que la diferencia que introduce este efecto es mínimo. Veamos entonces que ocurre con este sonido.

La onda en el tiempo

La onda en el tiempo se representa en la figura 1.

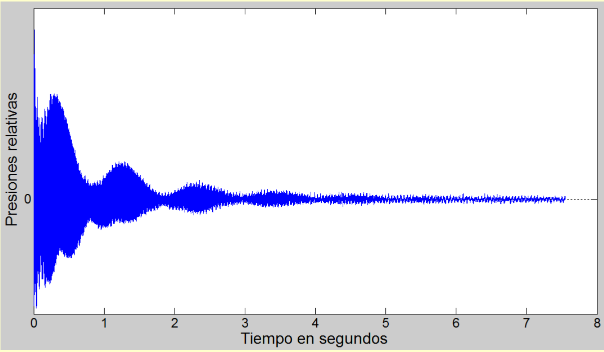

Figura 1: Onda completa (dominio del tiempo).

Vemos que el *sample* no es homogéneo en el tiempo, en el sentido de que se observan claramente varias zonas en el mismo con ligeras diferencias de comportamiento.

Así, en primer lugar, observando la onda globalmente, vemos unos pulsos con un período de algo menos de un segundo precedidos de una zona irregular que corresponde al ataque de la nota y una envolvente exponencial que describe el comportamiento hasta la mitad de la onda de manera clara, pues se aprecia que posteriormente tenemos una zona estable en amplitud, debido a que la amplitud de vibración ya se ha amortiguado lo suficiente como para que los efectos disipativos relacionados con la elasticidad de la cuerda hayan “desaparecido”.

Al “acercarnos” a la onda en la figura 2, vemos su forma concreta, esta varía con el tiempo, es decir, no es constante, sino que presenta unos picos que se van “moviendo” por la onda a lo largo de su evolución. Finalmente se observa otra diferencia importante de comportamiento entre la parte inicial, hasta los 4 segundos y medio, donde la forma de onda es variable, pero regular (el mismo patrón se repite) y la parte final, que no sólo presenta rugosidad por el ruido ambiente (al ser la potencia sonora pequeña, los sonidos del ambiente afectan a la grabación), si no que aparecen formas y periodicidades nuevas que antes no estaban.

Si observamos con atención, vemos que las nuevas formas que aparecen al final tienen similitudes con las anteriores, lo cual es lógico, pues al fin y al cabo, es el mismo sonido.

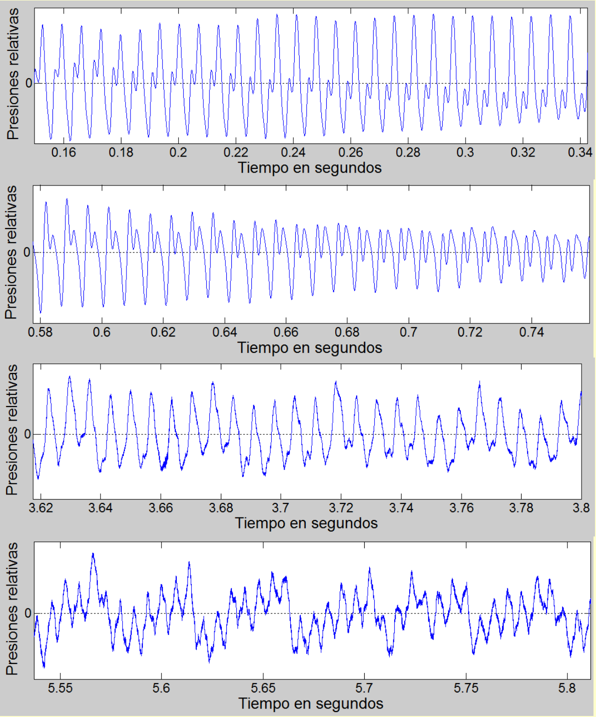

Figura 2: Partes inicial (suave y regular) y final (rugosa y con nuevas periodicidades)

La onda en frecuencias

En la figura 3 tenemos la transformada de Fourier de la onda completa.

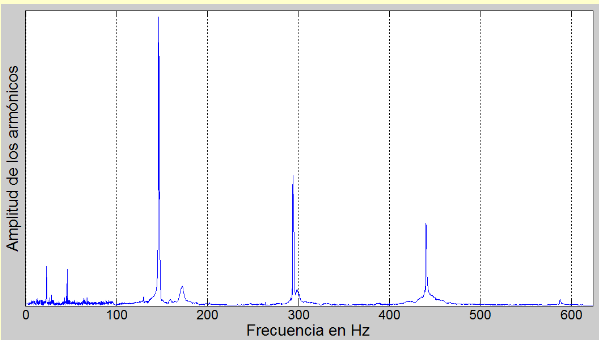

Figura 3: Cuatro primeros armónicos de la transformada de Fourier de la onda completa, se observa un pico pequeño al lado del armónico fundamental (pico más alto), es el llamado lobo. También observamos los picos de baja frecuencia que corresponden a las periodicidades nuevas del final de la onda

A simple vista, predominan los armónicos fundamentales (que corresponden a la frecuencia de la nota y sus múltiplos), y sabemos que las relaciones de amplitud entre los armónicos son las que determinan el timbre. También tenemos otras frecuencias destacadas en las frecuencias bajas (22 y 45 Hz), unos picos a los que contribuirá esencialmente la parte final (si al hacer la transformada de Fourier no estuviera esa parte final, estos picos de baja frecuencia no aparecerían) y corresponden a estas nuevas periodicidades que aparecían. También podemos apreciar que la frecuencia fundamental, de 145.78 Hz, tiene a su lado uno pico "hijo" al que contribuirá más la parte inicial de la onda y que corresponde al famoso lobo (en este violonchelo, como en muchos otros, aparece en los 172 Hz, que corresponde a la nota Fa 2). El lobo se fomenta sobre todo en la parte inicial de la onda, cuando se produce el sonido. Ello es porque cuando se inicia el sonido, la cuerda tiene suficiente energía como para transmitir una parte a los elementos adyacentes que fomentan esa vibración y "añadan" esa frecuencia. Este pico en 172 Hz aparece en mayor o menor medida en la mayoría de muestras tomada con el instrumento. Examinemos ahora el pico fundamental, que está cerca del lobo, tal y como se muestra en la figura 4 .

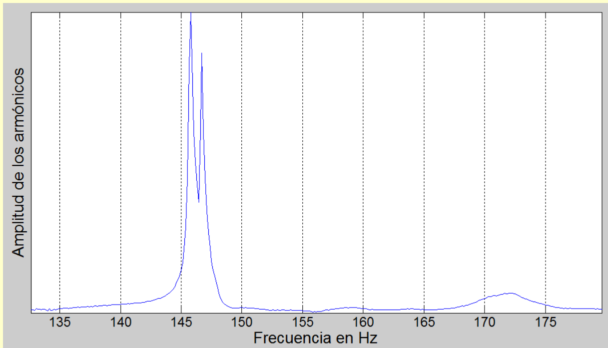

Figura 4: Detalle del pico fundamental, se observa una bifurcación en dos picos (145.78, y 146.7 Hz)

Así, tenemos que la frecuencia fundamental (frecuencia por la cual identificamos la nota) es la de 145.78 Hz (correspondiente a la nota Re 2) y tiene muy cercana una frecuencia de 146.7 Hz (se aprecia que el pico fundamental, a la izquierda, se "desdobla" en dos picos). Este pico doble es el efecto que tienen los pulsos en la transformada de Fourier (matemáticamente hemos dicho que los pulsos son suma de frecuencias cercanas). También observamos en muestras de otros sonidos con el instrumento, que esta bifurcación en el armónico (fundamental o no) aparece siempre en el que está cerca del lobo.

Análisis de los armónicos y modelo

En vista de las características de la onda, entendemos que la onda (al menos la parte estable) se podrá expresar matemáticamente como:

$$\text{Onda} = \sum \text{Armónicos}$$

Donde tenemos:

$$\text{Armónico}_n = A_{\text{relativa}, n} * \cos(\theta_n t) * e^{-a_n t} * \cos(\omega_n t + \varphi_n(t))$$

Así, tenemos que cada armónico tendrá una amplitud inicial relativa al primero (esta relación entre los pesos de cada armónico nos proporcionará el timbre del instrumento), los armónicos tendrán una envolvente compuesta por un coseno (los batidos) y una exponencial (por el fenómeno de atenuación propia de la cuerda libre real), y cada armónico tendrá una frecuencia ω_n que será, en principio, un múltiplo de la frecuencia principal (ω_n = 145.78, 145.78 * 2, etc.).

La función cosenoidal tendrá además una fase que dependerá linealmente del tiempo ($\varphi(t)$), pues hemos visto que la forma de la onda no es constante con el tiempo, si no que varía su forma. Lo haremos depender de manera que sea relativo al primer armónico, con lo que finalmente, la frecuencia de cada armónico no será un múltiplo exacto de la principal, tendrá un pequeño desfase que nos proporcionará la forma variable que queremos.

Antes de nada, debe quedar claro que la parte que intentamos modelizar es la parte inicial de la onda, pues es la parte que predomina en el sonido (la parte final es casi inaudible) y es también la zona con más regularidad. Tampoco nos ocupa ahora el modelizado del ataque, que tiene más complejidad. Dado que los armónicos que están por encima del cuarto no tienen casi relevancia, en el modelo introduciremos únicamente cuatro armónicos.

Para dar forma a un modelo, tenemos que estudiar cada armónico por separado, para ello nos ayudaremos de nuevo de la transformada de Fourier, pues si vamos analizando cada pocos períodos la onda, dado que la transformada nos da números complejos, tendremos información de la evolución de los armónicos en amplitud y fase en el tiempo. Las amplitudes en valor absoluto de los armónicos a lo largo del tiempo son las que aparecen en la figura 5.

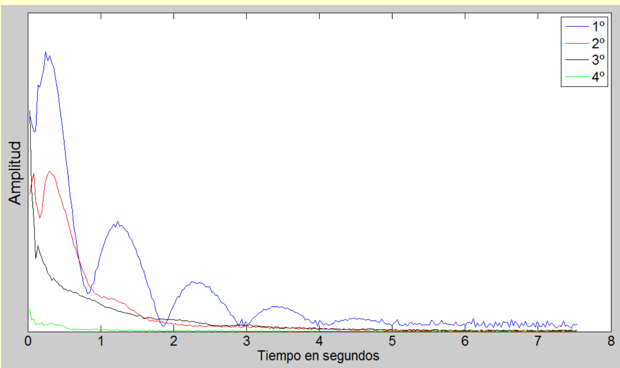

Figura 5: Amplitudes (en valor absoluto) de cada armónico en función del tiempo

Veamos qué ocurre aquí: en los primeros instantes aparece una zona de inestabilidad en los dos primeros armónicos (es la parte donde se produce el sonido), la zona intermedia, hasta los 4 segundos y medio es la parte más regular y cuando percibimos esencialmente la nota, porque la zona final es demasiado tenue al permanecer sonando únicamente el primer armónico (sin atenuación y con ruido ambiente, como dijimos). Esta es la zona final donde aparecían las periodicidades nuevas y el comportamiento más inestable.

Se observa que el único armónico que presenta el efecto de los pulsos es el primero, lo cual concuerda con la explicación anterior (pues es el que estaba más cerca del pico del Fa 2). Todos los armónicos, hasta los 4 segundos y medio, presentan la envolvente exponencial. Las fases de cada armónico a lo largo del tiempo son las que aparecen en la figura 6.

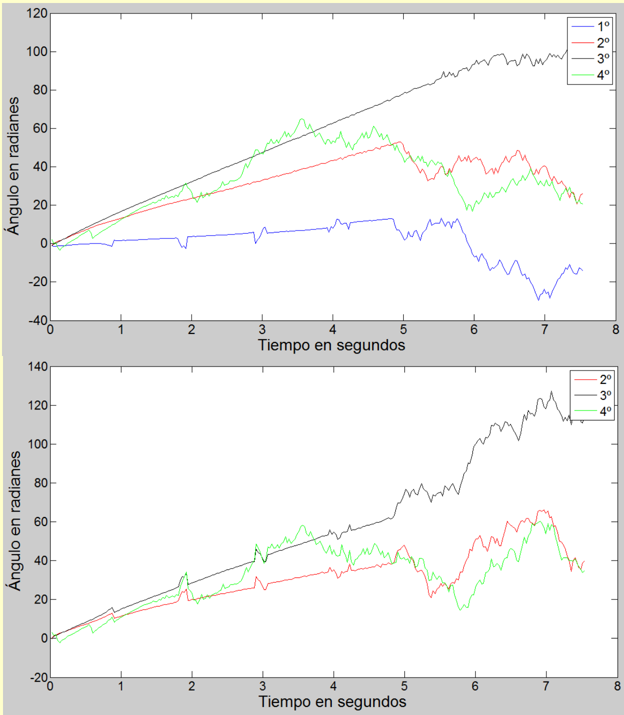

Figura 6: Fases de los armónicos (absolutas y relativas al primer armónico) de la onda estudiada, existe una relación en los ajustes las pendientes de 4.5*Nº de Armónico

En la figura 6 observamos que las fases de los armónicos 2, 3, y 4 se van adelantando al primero, como habíamos supuesto (la forma de onda va cambiando porque en cada momento la "suma" de los armónicos superiores está desfasada y el desfase va cambiando); las que presentan un comportamiento más lineal son las del primero, segundo y tercer armónico (pues al tener más peso, son más fáciles de analizar y tenemos más resolución). Y hasta los tres segundos, el comportamiento de todas las fases es bastante suave, aunque en el primer armónico se observan zonas de perturbación que coinciden con los mínimos de la envolvente, cuando su amplitud cambia de signo abruptamente (porque realmente la envolvente es un coseno). El desfase (la pendiente de las fases de cada armónico relativas al primer armónico) en este caso, según el ajuste lineal depende del número de armónico y es de 4.5*Nº de Armónico en las fases relativas al primer armónico. A partir de los 5 segundos, en la zona de inestabilidad, las fases comienzan a presentar un comportamiento mucho menos definido. Para el modelo tendremos que emplear el ajuste de las fases relativas al primer armónico, que hemos conseguido con una simple resta (figura 6, abajo).

Finalmente, si ajustamos las curvas (en la zona estable), y usamos el modelo propuesto de suma de armónicos, conseguimos la siguiente onda, representada en la figura 7.

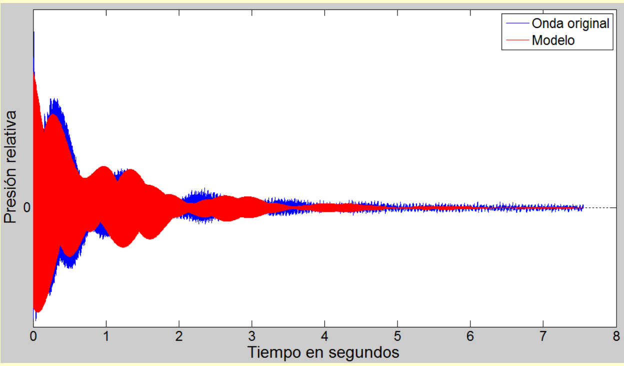

Figura 7: Modelo de la onda (en rojo) y la onda original

Este modelo se ha conseguido usando únicamente la suma de los cuatro primeros armónicos, y vemos que se ajusta bastante bien (como no hemos tenido en cuenta la zona final hay una clara diferencia entre la tendencia del modelo y la onda original), incluso en las formas que va adoptando y la sensación sonora que da cuando se reproduce (ver figura 8):

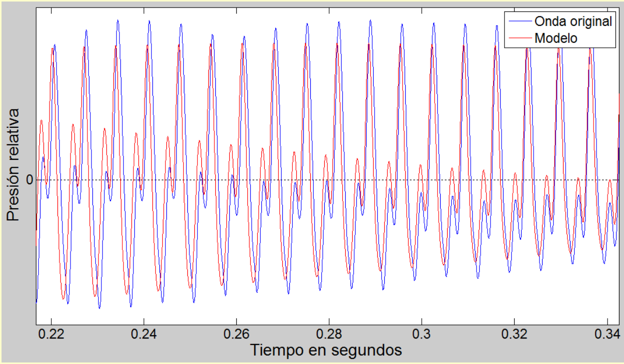

Figura 8: ¡Las formas de la onda y el modelo se parecen!

Conclusión

Finalmente, vemos que con la suma de cuatro armónicos hemos podido reproducir la onda inicial en su parte más importante (la parte audible). También hemos observado que, al estar la frecuencia fundamental cerca de una frecuencia parásita (como es el lobo), aparece el fenómeno de los batidos, tan temidos entre los instrumentistas. Así, cerca del lobo, los armónicos tienen una frecuencia que no es un múltiplo exacto del fundamental, si no que tienen un desfase que depende linealmente del número de armónico. Todo eso provoca que, en este caso, los armónicos que siguen al fundamental sean (virtualmente) múltiplos de una frecuencia $4.5/2\pi$ = 0.716 Hz (dividimos por 2π porque 4.5 es una cantidad en radianes, unidad natural de las fases que obtuvimos) mayor que la frecuencia fundamental (que corresponde a ese pico secundario de 145.78 + 0.716 ≈ 146.5 Hz).

Para saber más

ROSSING D. T., (1990) "*The science of sound*" Addison-Wesley

MERINO DE LA FUENTE J. M., (2006) "*Las vibraciones de la música*" Editorial Club Universitario

TOWNE D. H., (1988) "*Wave phenomena*" Dover