

Algunas notas sobre la acústica de la guitarra clásica

RICARDO RUIZ BOULLOSA*

*Centro de Instrumentos, Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
Apartado postal 70-186, 04510 México D.F., México*

Recibido el 24 de septiembre de 1996; aceptado el 27 de octubre de 1996

RESUMEN. La guitarra clásica constituye un sistema físico complejo cuyo estudio, por involucrar a los materiales de construcción en su etapa de diseño y a la música y al ejecutante, al medio ambiente en que se realiza el acto musical y en última instancia al oyente, debe conjuntar muchas disciplinas. En este trabajo se hace un acercamiento a la guitarra desde el punto de vista acústico, es decir, se mencionan algunos de los fenómenos físicos que tienen que ver con la generación del sonido musical y algunos de los factores que intervienen en su calidad. Este acercamiento puede motivar a algunos estudiantes de diversas disciplinas que tengan interés por la música, sus instrumentos y los fenómenos que intervienen en la generación del sonido musical, a profundizar más en un tema que es, por naturaleza, rico en posibilidades de estudio.

ABSTRACT. The classical guitar is a complex vibratory physical system. As such its study, involving by its very nature the materials of construction, the music and the player, the place where it is played and the audience, must consider several disciplines. In this work the guitar is considered as an acoustical system and some mechanisms involved in the sound generation are presented in a very general way. It is pretended to serve as an introduction for students to the acoustics of the guitar, a very rewarding area of study.

PACS: 43.75.Gh; 43.10.Sv.

1. INTRODUCCIÓN

La tradición filosófica occidental considera que la ciencia del sonido musical nació con Pitágoras, quien estudió las cuerdas vibrantes e identificó ciertos intervalos musicales (consonancias) con razones (cocientes) de números enteros simples, lo cual no sólo fue un avance enorme en la teoría de la música, sino fuente de apoyo e inspiración al aspecto numerológico de su doctrina. La Escuela Pitagórica llegó a establecer que “todo lo que puede ser conocido tiene un Número” (Filolaus, siglo V A.C.) y que la matemática está compuesta por *la astronomía, la aritmética, la geometría y la música*, cuyos contenidos son magnitudes en *movimiento*, números *absolutos*, magnitudes en *reposo* y números *aplicados*, respectivamente. Estas cuatro divisiones del conocimiento fueron designadas posteriormente como el *quadrivium*, el cual sobrevivió hasta los tiempos medievales como la parte científica de la educación superior [1].

*Electronic mail: rrb@aleph.cinstrum.unam.mx

La acústica musical (el estudio del sonido musical) fue durante los siglos siguientes parte importante del quehacer científico, aunque estaba orientada al aspecto musical del sonido (intervalos, escalas, acordes, consonancias, etc.). Fue en el siglo XIX cuando se despertó el interés en el comportamiento acústico de los violines italianos de los siglos anteriores: los violines de *Amati* (aprox. 1550), de *Stradivarius* (alrededor de 1650) y de *Guarneri* (aprox. 1700), que aún tiene enorme fama, están coronados por una aureola de perfección musical y alcanzan precios exorbitantes. Las técnicas de su manufactura fueron pasando oralmente de maestros a alumnos, dentro de la gran tradición medieval de los gremios artesanales a lo largo de muchos años, lo cual derivó, como en otros campos, en la ausencia de documentos o escritos sobre el arte de la construcción de violines. Con el paso del tiempo esta tradición oral también se fue perdiendo.

El análisis científico de los violines en el siglo XIX surgió con el propósito de sacar a la luz los mecanismos y razones físicas por los cuales esos instrumentos tienen tan alta calidad de sonido y con ello recuperar los secretos perdidos, con lo cual se podría, quizás, imitarlos. Algunos científicos renombrados del siglo XIX, como *Savart* (1791–1841) y *Helmholtz* (1821–1894), dedicaron parte de su tiempo a este propósito sin tener en ningún caso frutos definitivos. El desarrollo de la acústica como una rama independiente de la ciencia en la segunda mitad del siglo pasado y principios del presente, y los avances en el instrumental científico en la segunda mitad de este siglo, brindaron la posibilidad de utilizar métodos objetivos de investigación, originando un nuevo auge en la acústica musical en años recientes en varios países. El estudio de los violines se extendió a otros instrumentos musicales clásicos, tales como la guitarra clásica. En la década de los treinta y los cuarenta empezaron a aparecer estudios sobre instrumentos de viento, metales y maderas, y en los setentas y ochentas se extendió a los instrumentos de percusión, tanto dentro de la tradición clásica europea, como de otras culturas.

Este acercamiento de la ciencia a una actividad artesanal cuyas fórmulas de trabajo son producto de la tradición de varios siglos, puede dar lugar a fricciones o sospechas entre sus practicantes, pero si se entiende este acercamiento como un interés legítimo de la ciencia que puede en algunos casos ayudar a entender, por un lado, cómo funciona un instrumento o explicar ciertos problemas que pudieran tener otros (por ejemplo, de afinación, de sonoridad, etc.) y, por otro lado, clarificar por qué ciertas formas de proceder en la construcción de los instrumentos son correctas en la mayoría de los casos y por qué otras pudieran ser incorrectas, producto de mitos o tradiciones que no tienen una base sólida, en vez de un choque, se puede tener un acercamiento que podría redundar en un entendimiento mayor de los instrumentos musicales que beneficiará tanto a los músicos (pues el sonido es producto del comportamiento acústico) como a los constructores, quienes construirían con bases más sólidas, y a la ciencia al tener más conocimientos de los fenómenos que ocurren en los instrumentos y que algunas veces son aplicables en otras áreas.

2. ALGUNOS ANTECEDENTES DE LA GUITARRA CLÁSICA

El grupo de las guitarras comprende un gran número de instrumentos en varias partes del mundo (guitarras clásica, flamenca, acústica y eléctrica, requinto, cuatro, charango, etc.)

y que pertenece, en la clasificación de Sachs, al grupo de los cordófonos, cuyo elemento vibratorio primario son las cuerdas. El antecesor más primitivo de estos instrumentos es el arco musical, cuyo débil sonido es amplificado poniendo un extremo en la boca del ejecutor o pegándole un resonador en el arco. En algún momento se le añadieron cuerdas de igual o diferente longitud, para dar varios tonos y esto combinando con una caja resonante permanente en un extremo, produjo el arpa de arco y la lira (en ésta los tonos de cada cuerda de igual longitud se variaba con la tensión). Los griegos tenían dos clases de liras: la *lira* y la *Kitara* [2], ésta última fue adoptada por los romanos y parece que dió origen al nombre moderno de la guitarra. Aunque desde el 2000 A.C. existían en Mesopotamia y Egipto, instrumentos con mástil largo y una caja de resonancia (el *nefer* en Egipto) [3, 4], el principio de cambiar el tono de las cuerdas con trastes en un mástil apareció mucho después; así aparecieron instrumentos como la *pandura* griega, la *cítara* y *pandura* de la India, el *samisen* japonés, la *pípá* china; el dominio árabe en España introdujo el *alúd* y otros instrumentos y en algún momento aparecieron el *laúd* europeo, la *vihuela* y la *guitarra* española (junto con otros instrumentos de diversas formas y tamaños).

La cantidad de instrumentos pulsados, usados en Europa durante la Edad Media, era muy grande. En el siglo XVI, sin embargo, eran menos, ya fuera por desuso o porque algunas formas que aunque ganaron aceptación dieron lugar a otros instrumentos más perfeccionados [5]. Éste es el caso de la vihuela y la guitarra de 4 órdenes (pares de cuerdas, algunas afinadas al unísono, otras a tercera mayor o a una cuarta,¹ que fueron favorecidas, como lo demuestra la cantidad de música escrita para ellas, en los siglos XVI y XVII (subsisten grandes libros con más 700 partituras de Sanz, Fuenllana, Bermudo, etc., tan sólo en España).

Estos dos instrumentos influenciaron, junto con el laúd (que perdió popularidad a finales del siglo XVIII), el desarrollo de la guitarra. Las primeras guitarras coexistieron a principios del Renacimiento con la vihuela y el laúd [6]. La evolución del instrumento no es muy clara, pues a veces se usaban indistintamente los términos de guitarra y vihuela. Sin embargo, parece que de la guitarra de 4 órdenes se derivó la de 5 órdenes (según Sanz, Espinel² añadió la quinta cuerda y el instrumento “alcanzó entonces la perfección”) y fue llamada entonces *guitarra española* en Italia y Francia [6]. Esta guitarra sufrió una serie de cambios que dieron por resultado la de 6 cuerdas, a principios del siglo XIX, con la afinación actual de 4-4-4-3-4.³

Antonio Torres, en la segunda mitad del siglo XIX, experimentó diversas innovaciones que dieron a la guitarra una brillantez, calidez y potencia sonora hasta entonces desconocidas. Aumentó su tamaño, generó las costillas en abanico, fijó la longitud de las cuerdas en 65 cm y el ancho del diapasón en 5 cm [2, 7]. Así, el desarrollo de la guitarra cubre un intervalo de cuatro siglos de historia antes de llegar al instrumento moderno. En la Fig. 1 se muestra el crecimiento en las dimensiones que tuvo la guitarra del siglo XV a nuestros días.

¹Intervalos musicales en que los tonos están separados por 0, 5 ó 6 semitonos

²Poeta y músico español, 1550–1624, que escribió décimas que llevan el nombre de *espinelas*.

³Intervalos musicales entre las cuerdas empezando desde la cuerda más grave: mi(82.41 Hz)-la(110.00 Hz)-re(146.83 Hz)-sol(196.00 Hz)-si (246.94 Hz)-mi (329.63 Hz).



FIGURA 1. Evolución del tamaño de la guitarra clásica.

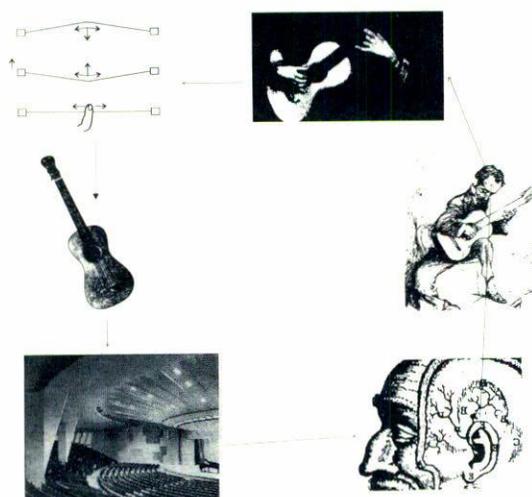


FIGURA 2. Cadena de sucesos que ocurren al “tocar” la guitarra.

3. ACÚSTICA DE LA GUITARRA

Cuando un ejecutante pulsa la cuerda de una guitarra, se genera una cadena de eventos complejos que forman un ciclo cerrado con respecto al ejecutante; esta cadena se puede representar por la sucesión de eventos mostrada en la Fig. 2. Cuando el ejecutante pulsa la cuerda comunica energía en forma de vibración que pasa por el puente de la guitarra al vientre, paredes y espalda o tapa posterior de la guitarra. Las vibraciones del cuerpo de la guitarra mueven a las partículas de aire, a las cuales, debido a que sus frecuencias de vibración (número de oscilaciones que realizan en un segundo) están dentro del intervalo audible del ser humano, les llamamos sonido; este sonido se difunde en el recinto y después es captado por los oídos, percibido e interpretado por el cerebro del ejecutante, quien

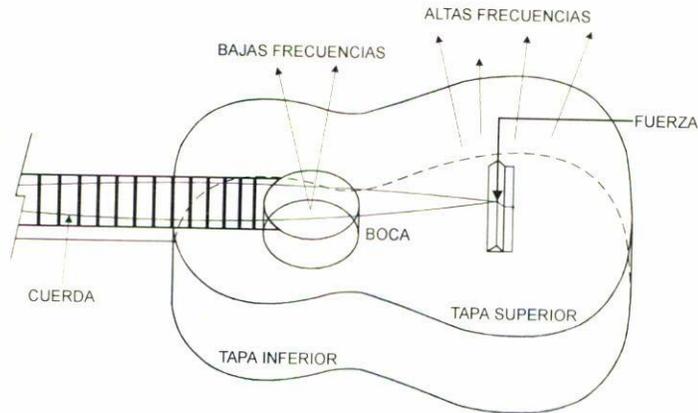


FIGURA 3. Elementos físicos que participan en la generación del sonido en una guitarra.

utiliza la información para alterar y mejorar su ejecución en función de lo que reciben sus oídos, debido a que el sonido es modificado por el recinto.

Aunque en cada uno de estos eventos existen otras cadenas de eventos complicadas que no se discutirán, se limitará la discusión a analizar someramente lo que sucede en el camino entre la cuerda y el micrófono o el oído que recibe el sonido en el recinto.

3.1. FUENTES DE ENERGÍA

Desde el punto de vista físico, la guitarra constituye un sistema vibratorio complejo en donde hay que considerar las fuentes de energía, el acoplamiento de esta energía al cuerpo de la guitarra y las funciones que cada parte de este último tienen en el proceso de generación del sonido. La fuente de energía en este sistema la constituye cualquier cuerda que sea excitada; la energía de excitación normalmente se provee pulsando la cuerda con la yema de un dedo, con la uña o con un plectro, que genera una vibración amortiguada o *transitoria*, ya que el sonido nace, alcanza una intensidad máxima y después muere (decae) en cierto tiempo. En la Fig. 3 se muestra un esquema de los elementos que participan en la conversión de la energía generada por el ejecutante desde la cuerda hasta el recinto. Esta energía es transmitida a través del puente a la placa superior y de ésta al aire en la cavidad y la espalda (placa trasera). A bajas frecuencias el puente actúa como parte de la placa, la cual transmite energía, vía el volumen de aire, a la placa posterior y a la boca de la cavidad. A altas frecuencias la parte fundamental que radía sonido es el vientre (tabla superior) y las propiedades mecánicas del puente se tornan importantes al influenciar las vibraciones del vientre.

Analizaremos someramente los eventos que ocurren en este modelo simple considerando los diversos elementos, empezando con las cuerdas.

3.2. CUERDAS

Cuando un ejecutante jala o pulsa una cuerda, por ejemplo, en un punto a la mitad de su longitud, adoptará la forma de un triángulo isósceles cuyos vértices son los puntos de apoyo de la cuerda y el punto donde se apoya el dedo o uña. Cuando la suelta, la cuerda

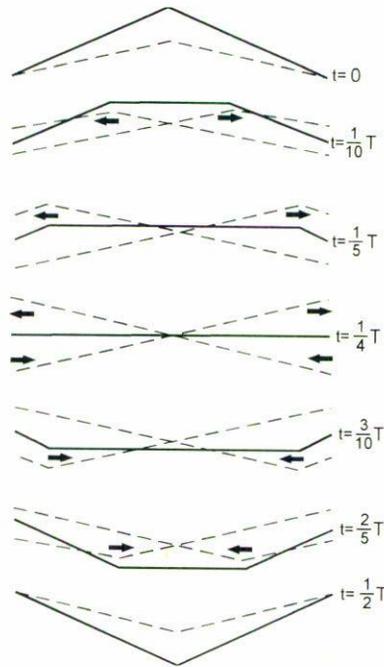


FIGURA 4. Triángulo inicial que define la forma y fronteras del movimiento de la cuerda, el segmento de recta se mueve aumentando o disminuyendo su longitud.

vibrará de tal forma que una sección recta de pendiente constante viaja —cambiando de longitud— entre las fronteras de un paralelepípedo, que se obtiene invirtiendo el triángulo inicial sobre el eje de la cuerda como se muestra en la Fig. 4.

Se puede obtener la forma de la cuerda en cada instante si se interpreta el pulso inicial como dos pulsos idénticos que se desplazan en sentidos diferentes. La forma inicial (al tiempo inicial igual a cero) puede obtenerse también sumando los modos de vibración⁴ con frecuencias, amplitudes y fases adecuadas en cada punto, en toda la extensión de la cuerda. La forma paralelepípeda en una cuerda real se va deformando al pasar el tiempo, de tal manera que las esquinas angulosas se van suavizando conforme los modos de vibración superiores son amortiguados. Finalmente sólo queda la vibración fundamental de la cuerda, la cual vibra adoptando la forma de un arco en sus posiciones extremas; la cuerda para entonces vibra como una onda estacionaria de forma senoidal. Si la cuerda es pulsada en un punto, por ejemplo a $\frac{1}{5}$ de un extremo, se observa que el quinto armónico falta en el espectro de frecuencia de la forma inicial⁵; en general el n -ésimo armónico está ausente cuando se excita la cuerda a una distancia l/n de uno de los extremos, donde l es la longitud de la cuerda y n es un entero. La fuerza que la cuerda ejerce en el puente es tangencial a la cuerda y su magnitud depende del grado de elongación, área seccional y módulo de Young. La fuerza transversal se comporta en el tiempo como se muestra en

⁴Los modos de la cuerda son las diferentes ondas estacionarias que pueden existir en ella, cada uno tiene una forma, una frecuencia y un amortiguamiento característicos

⁵Se le llama espectro de frecuencia a la gráfica de amplitudes de los armónicos contra frecuencia.

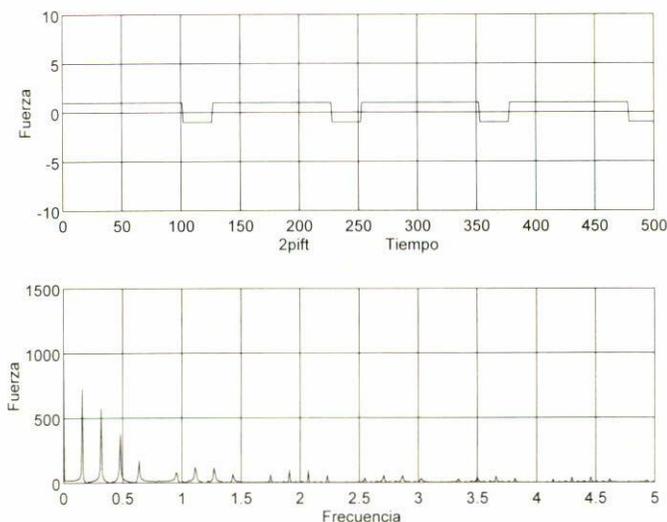


FIGURA 5. Forma de onda en el tiempo de una cuerda pulsada (gráfica superior). Espectro de frecuencia correspondiente (gráfica inferior).

la Fig. 5. El espectro de la fuerza es el espectro de excitación que será modificado por los diversos elementos mecánicos que siguen en la cadena de emisión del sonido [8].

La forma de onda real se ve modificada por la rigidez, el amortiguamiento y la manera en que se excita (dedo, uña o plectro) y, porque en realidad, al excitar la cuerda se generan vibraciones longitudinales y torsionales. Por otro lado, las cuerdas reales tienen cierta rigidez —lo cual introduce inarmonicidad— y pierden energía —gracias a lo cual podemos oír las vibraciones— debido al movimiento de la tapa, disipación interna, fricción en el aire, etc.

Hay, sin embargo, una disipación o pérdida de energía que interesa maximizar: la que va al vientre de la guitarra ya que parte de ella se convertirá en sonido.

3.3. VIBRACIONES DEL CUERPO DE LA GUITARRA

Si la cuerda comunica su movimiento a una superficie grande, como el vientre de la guitarra, es evidente que la energía se disipará más rápidamente que si la cuerda estuviera aislada, por lo que el sonido emitido será más breve pero a la vez más intenso.

Lo anterior nos lleva a uno de los problemas importantes en el sonido de la guitarra: la distribución de energía en el tiempo y en la frecuencia, de tal manera que la duración sea óptima y musicalmente interesante.

Sin embargo, no sólo vibra el vientre, las vibraciones viajan (como ondas mecánicas) a la espalda o tapa posterior y al aire en la cavidad, aunque prácticamente toda la guitarra vibra. Cada una de estas partes tiene diferentes funciones y, desde el punto de vista mecánico, diferentes modos de vibración que están acoplados entre sí en grados diferentes.

El sonido es radiado fundamentalmente por el vientre y la boca de la cavidad, pero también la tapa posterior contribuye a ciertas frecuencias y todas estas partes contri-

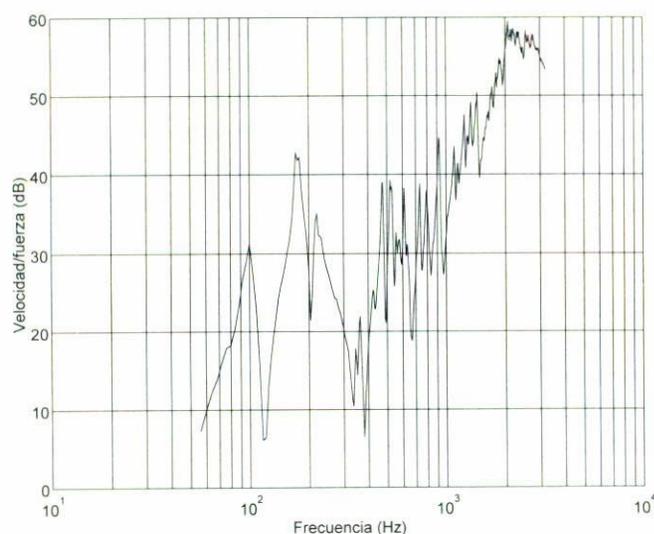


FIGURA 6. Respuesta en frecuencia de entrada de la tapa de una guitarra, aceleración/fuerza.

buyen simultáneamente al campo sonoro total en el recinto donde se toca la guitarra; complicando la situación aún más, estas contribuciones varían, además, con la frecuencia. Una manera muy usada y directa de documentar la respuesta de la guitarra a las excitaciones senoidales ejercidas por una cuerda, es obtener la respuesta de la guitarra a una excitación con tonos puros que varían en frecuencia en todo el compás o registro de la guitarra.⁶ La Fig. 6 muestra una curva de la respuesta de entrada de la tapa de una guitarra.

También se puede obtener la respuesta de radiación de presión en una cámara anecoica.⁷ La curva de radiación representa la magnitud en decibeles de la presión sonora en las posiciones indicadas; la respuesta de vibración (o de entrada, pues es la respuesta del vientre a la excitación primaria) es la magnitud en decibeles de la señal producida por un acelerómetro colocado en el punto de excitación.

Para simplificar se dividirá la discusión en dos partes, una relativa a la radiación a bajas frecuencias y otra relativa a altas frecuencias.

3.4. RESONANCIAS A BAJAS FRECUENCIAS

La radiación a bajas frecuencias (100–600 Hz) es importante, debido a que el compás fundamental de la guitarra ocurre en esta zona de frecuencias.

La resonancia más baja en la guitarra ocurre a frecuencias alrededor de 100 Hz. En esta resonancia un pequeño cilindro de aire (como un pistón de aire) vibra comprimiendo

⁶Usualmente se excita en el puente con algún excitador electromagnético y la respuesta puede ser la radiación de sonido a cierta distancia o la respuesta de vibración en el punto de excitación o en algún otro punto del vientre de la guitarra. Estas respuestas se obtienen con un micrófono y un acelerómetro, respectivamente.

⁷Recinto especial en que las paredes, techo y aun el piso están recubiertos de una gruesa capa en forma de cuñas, de material absorbente (en realidad el “piso” es una malla de alambre arriba de las cuñas).

y descomprimiendo el aire en la cavidad de la guitarra, actuando como lo que se conoce como resonador de Helmholtz (además toda la tapa es forzada a vibrar ligeramente, por acoplamiento, a esta frecuencia). Abajo de la frecuencia de esta resonancia el sonido radiado por la cavidad está en contrafase y, en consecuencia, se opone a la radiación a la frecuencia fundamental de la tapa. En esta zona de frecuencias, la radiación de la cavidad y de la tapa corresponde acústicamente a un dipolo.⁸ Sin embargo, arriba de dicha frecuencia la concordancia de fase va aumentando hasta que a alrededor de 200 Hz están en fase. El efecto neto de esa concordancia de fase en esta zona de frecuencias, es aumentar la radiación de sonido muy eficientemente [9]. En resumen, se puede decir que la ventaja de la cavidad de la guitarra desde el punto de vista acústico es que ayuda a extender la respuesta de los bajos (bajas frecuencias); esto se podría lograr también (con menos eficacia) si se pudiera adelgazar la tapa o fijarla de una manera más flexible, acción que estaría limitada por otras cuestiones estructurales y acústicas.

Cuando el vientre de la guitarra vibra, lo hace en modos de vibración⁹ que ocurren a ciertas frecuencias y que están determinadas por la estructura y propiedades de la madera, cuya influencia se abordará posteriormente.

Un hecho experimental es que el vientre de la guitarra clásica vibra a frecuencias menores a 500–600 Hz en sólo cinco modos de vibración [10]. La notación (n, m) designa que el vientre está dividido en $n + 1$ partes vibrantes horizontalmente y $m + 1$ partes verticalmente.

El modo $(0,0)$, correspondiente a la frecuencia fundamental de la tapa mencionada anteriormente, ocurre en una frecuencia cercana a 200 Hz y también (con amplitudes menores) a frecuencias cercanas a 100 Hz, es decir, aparece dos veces ya que está acoplado a la resonancia más baja (cerca de 100 Hz) y vibra con una amplitud pequeña. La radiación del modo $(0,0)$ corresponde a un monopolo acústico

El modo $(1,0)$, llamado comúnmente “dipolo cruzado”, es un modo de vibración asociado a una radiación acústica débil; ocurre a alrededor de 240 Hz.

El modo $(0,1)$ “dipolo largo” es similar al anterior, pero en general no es simétrico con respecto a la línea nodal y ocurre a frecuencias alrededor de 340 Hz.

El modo $(2,0)$ o “tripolo” es un modo de radiación fuerte, como el monopolar, porque efectúa una compresión neta del aire alrededor de la guitarra y ocurre a alrededor de 420 Hz. Según el tamaño y construcción de la guitarra, estas frecuencias de resonancia pueden variar hasta por 50 Hz.

El modo $(1,1)$ o “cuadrupolo”, a aproximadamente 500 Hz, es un modo de radiación relativamente débil, pues las fases contrarias de sus cuatro partes vibrantes tienden a anularse. Estos modos pueden, según el punto de aplicación de la fuerza, ser excitados simultáneamente en fase o en oposición de fase y sus efectos se manifiestan en la curva de respuesta sonora como valles más o menos elevados entre las resonancias.

⁸Fuente sonora simple que idealmente corresponde a una esfera cuyo radio varía senoidalmente con el tiempo y emite ondas esféricas, de igual manera un “dipolo” es un arreglo de dos fuentes simples muy cercanas que vibran a la misma frecuencia, pero con fases contrarias y cuya radiación es débil y nula en algunas direcciones.

⁹Las vibraciones del vientre están relacionadas con resonancias donde la fuerza de la cuerda excita uno o más modos de vibración o formas características que adquiere el vientre y que se describen por su forma, su amortiguamiento, y su frecuencia de vibración.

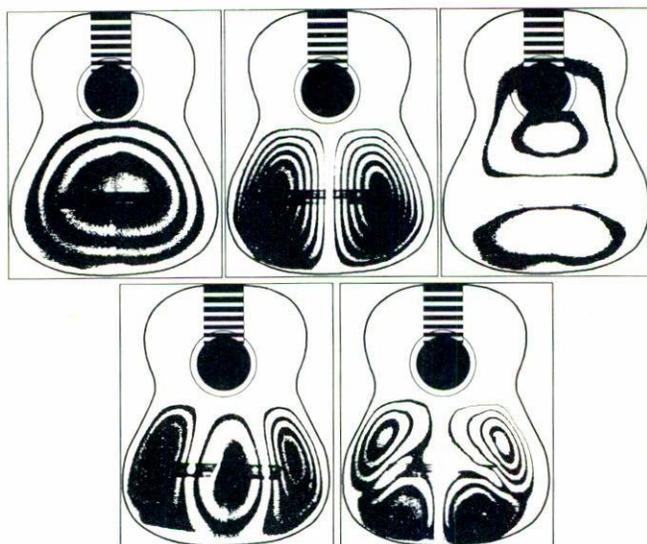


FIGURA 7. Modos de vibración de la tapa de una guitarra clásica. Las líneas continuas señalan contornos de igual amplitud, el máximo ocurre en las zonas centrales.

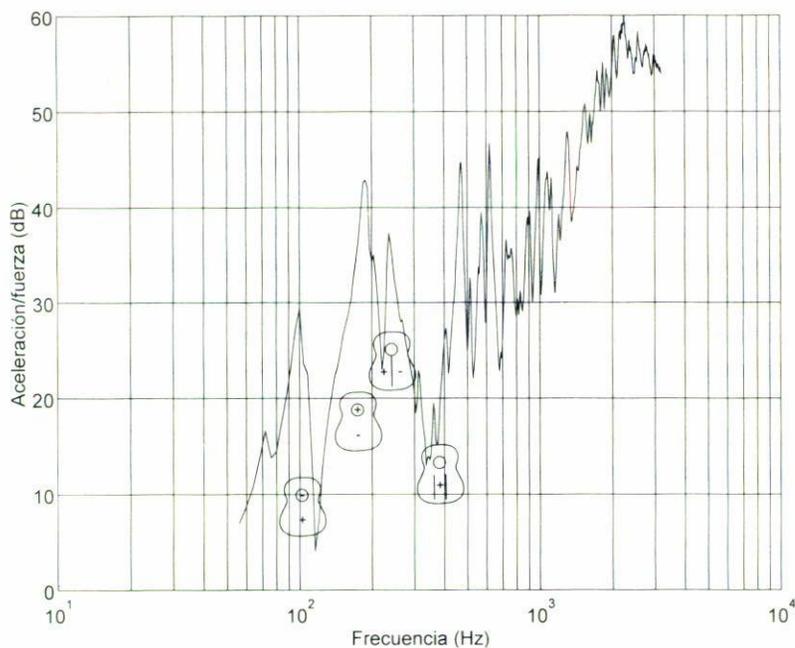


FIGURA 8. Modos de vibración asociados a las resonancias de la respuesta en frecuencia, los signos + y - señalan la fase del movimiento relativo.

Lo anterior tiene relevancia con respecto al punto de aplicación de la fuerza por las cuerdas, ya que éstas aplican la fuerza precisamente en una zona donde el modo (0,0) y el (1,1) son excitados fuertemente y en consecuencia estos dos modos son responsables de la

mayoría de la radiación en la zona de bajas frecuencias a 600 Hz. En la Fig. 7 se muestran varios modos obtenidos por interferometría holográfica o análisis modal [11, 12].¹⁰

Las frecuencias varían según la elasticidad (módulo de Young), número de costillas en el vientre, etc., pero las formas generales son semejantes a las mostradas [11, 12] en dicha figura. Analizando las curvas de respuesta y los modos de vibración, se pueden identificar las frecuencias de resonancia correspondientes a cada modo y asociar un pico en la respuesta con el modo correspondiente, hasta alrededor de 500 Hz, como se muestra en la Fig. 8.

Un hecho que vale la pena resaltar, es que el registro o compás de las notas fundamentales de la guitarra ocurre dentro del intervalo de frecuencias en que ocurren los cinco modos de vibración mencionados, de ahí la importancia que tienen desde el punto de vista acústico y musical.

3.5. RADIACIÓN A ALTAS FRECUENCIAS

El comportamiento a altas frecuencias ha sido menos estudiado, sin embargo, se sabe que arriba de 500–600 Hz las resonancias corresponden a modos de vibración más complicados, que corresponden a fuentes multipolares constituidas por modos de la placa en que muchas partes vibran en fases diferentes; estos modos radían en patrones espaciales complicados y se traslapan más a altas frecuencias.

El espectro de radiación a muy altas frecuencias (1000–6000 Hz) constituye un continuo de resonancias. Quizás la envolvente en bandas de frecuencia de las resonancias o la eficiencia de radiación¹¹ sean descripciones más adecuadas para la radiación en esta zona de frecuencias. El problema de la radiación a altas frecuencias ha sido un tanto difícil de estudiar, ya que las energías involucradas son muy pequeñas, lo cual dificulta el estudio experimental; este problema aún está en estudio, pero parecería que esta descripción podría usarse para distinguir diferentes instrumentos, pues la radiación a altas frecuencias refleja de alguna manera la capacidad de resonar que tiene el vientre en la zona de sobretonos o armónicos de las notas fundamentales, que son las que dan brillantez y claridad al sonido de la guitarra. En la Fig. 9 se muestra un espectro, en bandas de tercios de octava, de la eficiencia de radiación, obtenidas por el autor, aunque en una zona de no muy altas frecuencias. Los puntos (*) corresponden a una guitarra que subjetivamente se considera buena, los puntos (o) corresponden a una guitarra que se considera como mala, los otros puntos son de guitarras de calidad media-baja.¹²

3.6. TRANSFORMACIÓN DEL ESPECTRO DE LAS CUERDAS POR EL CUERPO DE LA GUITARRA

¿Qué importancia tiene todo esto para el sonido de la guitarra, si después de todo, uno no usa tonos puros ni los barre en frecuencia en el compás de la guitarra, ni lo tonos

¹⁰Técnica experimental que utiliza los espectros de vibración obtenidos en varios puntos para una excitación dada, que resulta en la obtención de los parámetros modales: frecuencia, amortiguamiento y forma modal.

¹¹La relación entre la energía acústica radiada y la energía mecánica introducida a la tapa de la guitarra, en ciertas bandas de frecuencia.

¹²La eficiencia no tiene unidades por ser el cociente de la potencia mecánica que entra al vientre entre la potencia acústica radiada.

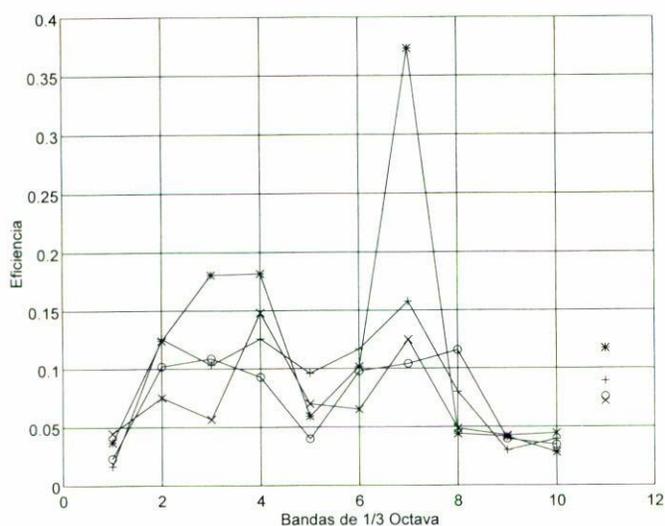


FIGURA 9. Eficiencia de radiación de tres guitarras en bandas de 1/3 de octava. La ordenada da el cociente de la potencia de salida a la de entrada.

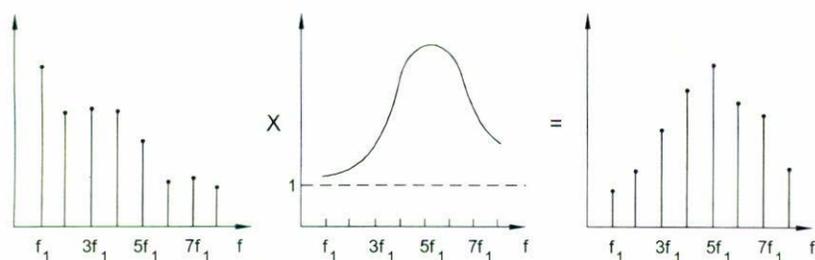


FIGURA 10. Efecto de filtrado de la señal original (dada por la cuerda) por parte de la tapa y el cuerpo de la guitarra.

de las cuerdas tienen un espectro continuo de frecuencias? Cuando se toca una nota particular, el espectro de fuerzas de la cuerda es transformado fundamentalmente por la respuesta que el puente y vientre tienen de manera general (las curvas de respuesta mencionadas anteriormente) y es este espectro transformado y traducido a sonido el que emite la guitarra. Así, el primero, segundo, tercero, etc., armónicos de la cuerda serán cada uno modificado según la zona de la curva de respuesta de la guitarra en que ocurra. En la Fig. 10 se muestra el efecto de esta transformación, las resonancias actúan como filtros para el espectro original de la fuerza dado por la cuerda y dan por resultado el sonido emitido por la guitarra.

Si la frecuencia de la fundamental o de algún armónico de la cuerda ocurre en una zona de la respuesta en que hay una resonancia, el sonido tendrá una fundamental alta (o un armónico alto); si por casualidad o por diseño, la fundamental y varios armónicos coinciden con zonas de resonancia, la nota se oirá muy fuerte. También puede ocurrir que

la misma nota tocada en otra cuerda se oiga más débil, ya sea porque la cuerda misma sea más pesada o porque la cuerda excite más o menos un modo de vibración dado.

Para ajustar las frecuencias de resonancia de los tres modos fundamentales a bajas frecuencias, el laudero (o violero) puede hacer algunos ajustes en la tapa, quizás adelgazar los bordes o ajustar los extremos de las costillas. En general, la radiación a bajas frecuencias es relativamente alta en la mayoría de las guitarras y más o menos nivelada en cuanto a la amplitud de las notas. La excepción la constituye la resonancia de Helmholtz y la separación de casi una octava con la resonancia de la tapa (0,0), que hace que los tonos Sol_2 (98 Hz) y Sol_3 (196 Hz), tengan una respuesta exagerada y de poca duración.

4. CONCLUSIONES

Una discusión sobre la acústica de la guitarra no está completa si no se menciona el papel que los materiales de construcción juegan en el sonido de la guitarra. Sin embargo, la discusión de este factor sería tema de otro trabajo. La importancia de los materiales salta a la vista cuando se considera que cuando un laudero golpea la tapa de una guitarra antes de armarla, oye el tono que emite y aunque sea inconscientemente, oye la frecuencia (que corresponde al tono) del modo fundamental, hace una evaluación del amortiguamiento (si el tono persiste o no), la dobla o flexiona para darse idea de la rigidez de la madera (relacionada con el módulo de Young); si estos parámetros no se ajustan a lo que su particular filosofía y experiencia le dictan con respecto a cómo debe ser el sonido, hará algunos cambios en la geometría o en el material utilizado.

La influencia de otros factores aparte de los mencionados que tienen que ver con la estructura y la construcción de la guitarra no han sido muy estudiados; algunos de los caminos a seguir en el futuro podrían ser estudiar cómo controlar factores como el barreado¹³ y como influye en el sonido y afinación de las tapas superior e inferior, estudiar cómo controlar preferentemente algunos modos de vibración sobre otros, cómo evitar la interacción fuerte entre las resonancias de la cuerda y de la tapa de la guitarra (que influyen en la afinación), investigar el uso de nuevos materiales para su construcción, etc. Por supuesto, esto es una tarea difícil que involucra la cooperación de especialistas de varias disciplinas con los principales protagonistas de esta historia: el músico y el laudero.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Clara Alvarado Zamorano la revisión del texto final y los valiosos comentarios a la versión previa de este trabajo.

¹³La disposición de pequeñas barras en la parte interior del vientre que son las que entre otras funciones ayudan a dar rigidez a la estructura de la guitarra y tienen también la función de, aparentemente, suavizar el carácter fuertemente ortotrópico de la madera.

REFERENCIAS

1. F.V. Hunt, *Origins in Acoustics, The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton* (Yale University Press, 1978).
2. T. and M.A. Evans, *Guitars* (Paddington Press Ltd., London, 1978).
3. *Musical Instruments of the World* (The Diagram Group, Bantam, 1978).
4. S. Paganelly, *Musical Instruments from the Renaissance to the 19th century*, Hamlyn, (1966).
5. A. Kendall, *The World of Musical Instruments*, Hamlyn (1972).
6. H. Turnbull, *The Guitar, from the Renaissance to the present day* (B.T. Batsford Ltd., London. 1978).
7. I. Sloane, *Classic Guitar Construction* (E.P. Dutton and Co., Inc., New York, 1966).
8. T.D. Rossing y N.H. Fletcher, *The Physics of Musical Instruments* (Springer-Verlag, 1991).
9. I.M. Firth, *J. Acoust. Soc. Am.*, **61** (1977) 588.
10. A. Caldersmith, *C. Acoust. Soc. NL*, **35** (1981) 15.
11. R.R. Boullosa, *C. Acoust. Soc. NL*, **36** (1981) 17.
12. T.D. Rossing, *Journal of guitar acoustics*, **4** (1981) 45.