

LA GUITARRA FLAMENCA^(*)

Por ANTONIO ESPINÓS GUERRERO
Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

El autor ha escrito un artículo de la máxima originalidad: desmenuza los secretos de la guitarra estableciendo una tesis que puede conducir a formas nuevas, explicando por primera vez técnicamente la razón de la forma de la guitarra.

A los romeros que peregrinan año tras año para rendir su homenaje a la Virgen del Rocío.

Uno de los instrumentos musicales más universalmente conocidos es la guitarra, con la que hoy día se hace música en todos los continentes, bien interpretada por persona de la más alta alcurnia, por el bracero más modesto de Andalucía, por el indio andino de cualquier país sudamericano o por cualquier persona del exótico Extremo Oriente.

Siendo así la popularidad de este instrumento y su universalidad alcanzando a todas las clases sociales, vale la pena estudiar un poco tanto su historia como las características técnicas que intervienen para poder diseñarla y construirla, así como la dinámica que se emplea en su toque, siempre refiriéndonos a la guitarra flamenca que, aunque representa muy pequeña variación respecto a la guitarra de concierto clásico puesto que en definitiva se trata del mismo instrumento, sí tiene gran diferencia en lo que se refiere a su toque, ya que un gran mérito y quizá digamos condición indispensable para ser un buen tocaor de flamenco, es el no saber música, siendo por el contrario para el artista de concierto clásico con guitarra, condición indispensable y absolutamente necesaria, el saber música para poder interpretar.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de marzo de 1977.

1. Algo de historia.

El pretender hallar el origen de la guitarra, sería una tarea prácticamente imposible. Se conoce desde la más remota antigüedad, encontrándose esculpida en los bajo relieves del Alto Egipto que datan de las XI y XII dinastías.

Su forma y nombres han evolucionado con el tiempo de tal manera, que sería en extremo difícil encontrar otro instrumento musical que haya sufrido más variaciones que éste.

Al encontrarnos con la historia y analizar los acontecimientos que por la misma nos llegan, parece ser que en la Arabia primitiva, se conocía una guitarra de cuatro cuerdas que debió extenderse por Turquía y Persia.

La invasión árabe trae a España en el siglo IX la guitarra morisca, portada por un personaje singular de la época que llega a la corte de Abderraman II, el persa Ziryab, artista consumado en su país que, por superar a su maestro, produce tal conmoción y envidia, que para salvar su vida tiene que emigrar, siendo muy bien acogido en la corte de Córdoba, en la que existía una especial protección para los artistas.

Una de las condiciones especiales de Ziryab y que por ello pasa a la historia, es que además de ser un gran intérprete de los cantos hindúes y orientales, era un colosal experto de la guitarra, la que modifica añadiéndole una quinta cuerda a ese instrumento de la época, que era de forma triangular con una prima sencilla y tres cuerdas dobles.

A pesar de que el famoso Ziryab hubiese introducido la quinta cuerda en la guitarra morisca, ésta no se generaliza en España en la propia

guitarra española, hasta el año 1570, en que el ilustre malagueño Vicente Espinel y Gómez Adorno, le pone esta quinta cuerda, la prima, y cambia de afinación las restantes, quizá por el conocimiento e influencia que pudo adquirir de la operación de Ziryab en la guitarra morisca.

A finales del siglo XVIII, es decir, dos siglos más tarde del ajuste efectuado por Vicente Espinel, y sin saber quién fue su autor, aparece y se impone la guitarra de seis cuerdas, con parecida forma y la misma afinación que hoy conocemos. La sexta cuerda añadida, fue el bordón que lleva la misma afinación que la prima, aunque en tono inferior.

Durante todo el siglo XVIII la guitarra sigue evolucionando, hasta que a principios del siglo XIX, aparece en Almería el pionero y creador del moderno estilo de guitarra flamenca, Antonio Torres, que en su taller artesano de construcción de guitarras, ensaya y modifica la altura de la caja de resonancia doblándola prácticamente, revisa y modifica sus curvas al observar que las guitarras antiguas perdían volumen y resonancia, acorta y estrecha la parte inferior de la misma, al tiempo que ensancha y alarga la parte superior, y, en definitiva, lo que hace de forma intuitiva es llegar al tipo de guitarra que más adelante explicaremos, en que los sonidos, salen limpiamente del interior de la caja de resonancia por una abertura circular, sin colisionar con la tapa de la misma.

Antonio Torres resultó ser un genio en la construcción de guitarras, por lo que su influencia sobre los constructores de la época fue completa, muy especialmente sobre el madrileño Francisco González, quien formó a un aventajado discípulo, José Ramírez, que, empleando una moderna expresión, es cabeza de serie de una generación de constructores entre los que sobresale Manuel Ramírez, considerado como el mejor de su época por dejar escuela, de la que sobresalen tres aventajados discípulos que le suceden, Domingo Esteso, Modesto Borreguero y Santos Hernández, conocido este último como el mejor guitarrero de todos los tiempos, y cuyas guitarras son consideradas actualmente como los Stradivarius del flamenco y que, de encontrar alguna con su firma si se quiere obtener, las dificultades son grandes no solamente con referencia a su precio, sino por la estimación de dichos instrumentos como reliquias del pasado que no se pueden mejorar, aunque en mi

opinión cada día se construye mejor, con técnicas y materiales que se superan y perfeccionan.

El hermano mayor de Manuel Ramírez, conocido como José Ramírez I, crea una dinastía de buenos constructores que hoy día tiene sucesión, ya que a este le sucede José Ramírez II, continuando con José Ramírez III, con lo que han pasado tres generaciones por el mismo establecimiento.

José III es un personaje inteligente y singular. Se planteó el problema de que en la construcción de una guitarra para obtener un instrumento de calidad, no debería de intervenir el azar como venía sucediendo, ya que ésta debía darse resolviendo un problema matemático y físico, por el que pudiera justificarse la razón por la cual una guitarra podría ser aceptable, y cómo se podía mejorar.

Estudiando y experimentando pasaron muchos años, terminando por construir una guitarra que le satisfizo, pero que, en definitiva, estaba igualmente dimensionada que la fabricada intuitivamente por su tío Manuel Ramírez, la cual no había sido posible mejorar y de la que prácticamente era una copia.

Esta inquietud de José III ha sido transmitida a mucha gente, entre los que se cuenta el autor de este artículo que, también después de bastante tiempo de pensar en dicho tema trata de explicar algo sobre el mundo de la guitarra, con independencia de su evolución en calidad, ya que se construye mejor por los progresos de la Humanidad, que cada día obtiene mejores materiales para reemplazar a otros que anteriormente se empleaban como los más adecuados.

2. Elementos de que se compone la guitarra; calidad y función de los mismos.

Los elementos de que se compone una guitarra son los que a continuación se señalan:

- Un clavijero para dar tensión a las cuerdas.
- Un mástil con su diapasón y 18 trastes.
- Seis cuerdas.
- Una caja de resonancia con un puente en su parte más ancha para el anclado de cuerdas.

El clavijero para dar tensión a las cuerdas, situado en el extremo del mástil, tiene por objeto el afinar las mismas para dar las notas que correspondan. Se construía tradicionalmente con clavijas de ébano en forma troncocónica, que hoy día han sido sustituidas por el mecanismo de sínfin y corona, mucho más adecuado por su facilidad y exactitud para realizar el afinado.

El mango o mástil suele hacerse de cedro o caoba, casi siempre con madera procedente de Centroamérica, y sobre el mismo, va pegada la tapa del diapasón que suele ser de ébano africano.

El diapasón tiene una superficie plana con una cejuela de hueso y 18 trastes, de los cuales los 12 primeros se sitúan desde la cejuela a la caja armónica, y los seis restantes que completan el diapasón, terminan en la abertura circular situada en la tapa superior de la caja, llamada embocadura o tarraja.

Los trastes incluidos en el diapasón, son barritas metálicas incrustadas en el mismo que, con lo poco que sobresalen de la superficie, actúan como cejuelas auxiliares resultando que, pisando una cuerda sobre el diapasón, estos 18 trastes producirán al pulsar la cuerda, una serie de 18 sonidos ascendentes cromáticos, puesto que de un traste a otro existe un intervalo musical correspondiente a un semitono.

Como consecuencia de todo lo apuntado, se requiere que el diapasón tenga un rebaje gradual desde la parte superior hasta la embocadura, con el objeto de permitir la aproximación de las cuerdas al mismo y a la tapa de la caja, sin que se produzcan vibraciones parásitas.

Las seis cuerdas que discurren encima del diapasón de la guitarra, se apoyan en la cejuela del mismo y en el puente situado en la caja armónica, donde se anudan y anclan por un extremo, ya que por el otro, lo hacen en el clavijero desde donde se les da la tensión adecuada.

La longitud de la cuerda, se toma siempre por la distancia existente entre la cejuela de hueso de apoyo del extremo del diapasón, y la pequeña moldura de hueso del puente inferior situado en la caja armónica en la que se apoya, es decir, la longitud de cuerda que va a vibrar para producir un sonido. Esta longitud de la cuerda es de la máxima importancia, ya que condiciona el dimensionado de la guitarra.

A las cuerdas, partiendo de la más delgada, se las denomina prima, segunda y tercera, y a las restantes conocidas también con el nombre de bordones, se les llama cuarta, quinta y sexta. Las notas de afinación de prima a sexta corresponden a los tonos musicales descendentes MI, SI, SOL, RE, LA, MI.

Las cuerdas tienen tanta importancia como el mismo instrumento, ya que su calidad es algo definitivo en la guitarra, puesto que al hacerse de diversas materias aunque lleven la misma afinación, producen sonidos del mismo tono, pero de diferente calidad.

Los materiales que comúnmente se emplean hoy día, son para la prima, segunda y tercera, el nylon estirado y calibrado, y para los bordones, cuarta, quinta y sexta, cuerdas compuestas de un alma de nylon entorchada. Estas calidades, al parecer, son las que mejor van a la guitarra, puesto que son las que producen sonidos más homogéneos, suaves y dulces, que los que se obtienen con las cuerdas metálicas que prácticamente apenas se emplean, salvo en casos especiales, en que el toque se haga exclusivamente para bailar.

Para que las cuerdas produzcan sonidos perfectos, deben de estar muy bien calibradas, prácticamente rectificadas, para que mantengan con rigurosa exactitud su grosor en toda su longitud.

El que se cumplan esas condiciones resulta de la mayor importancia, ya que si la cuerda está mal calibrada y es más gruesa de lo que se requiere, tiene más peso por unidad de longitud, por lo que para obtener la misma afinación es necesario el dar más tensión, con lo que su pulsación resulta más dura con peligro de romperse. Si por el contrario, es más fina de lo que debe, alcanza su afinación antes de llegar a la tensión necesaria, quedando floja, por lo que vibra mal y cerdea, perdiendo mucho sonido y llegando incluso a producir sonidos parásitos, al golpear con los trastes al vibrar. Por ello, las cuerdas a emplear deben ser de marcas conocidas, cuya calidad esté bien acreditada y haya sido sancionada por la práctica.

La caja de la guitarra, que en definitiva, no es más que un amplificador del sonido producido por la vibración de la cuerda, se construye generalmente con madera de ciprés, preferentemente hace años, de los existentes en Aranjuez; la tapa superior que es la que canta, se constru-

ye con el mejor pino del Norte, aunque parece ser que ahora se empieza a dar preferencia al pino canadiense. En esta tapa superior está tallada la embocadura o tarraja, que es una abertura circular situada con la mayor exactitud, por donde ha de salir el sonido ampliado con la mayor limpieza, sin producir colisiones con la tapa de la caja.

La tapa superior de la caja, es la que recibe la vibración de la cuerda a través del puente inferior situado en la parte más ancha, haciendo cuerpo con dicha tapa a través de un pegamento, y por dicha vibración transmitida a la caja, el sonido se amplía. Esta vibración de la tapa se produce como la de una membrana sujeta en sus bordes y apoyada en dos finos travesaños de madera por encima y debajo de la embocadura, en la que en un punto determinado se le comunica una vibración. Los dos pequeños travesaños son necesarios, puesto que de otra manera la tapa superior en sentido longitudinal, con un punto débil en la embocadura por su gran longitud respecto a su fino espesor, en estado de reposo existiría una deformación permanente que desvirtuaría el sonido, y que al flexionar por vibración produciría sonidos indebidos y hasta pudiese llegar a romperse.

Dado que la membrana transmite la vibración de la cuerda, es absolutamente necesario prepararla para obtener un buen sonido, puesto que solamente sujeta por el borde y apoyada en dos travesaños, su recuperación al estado de equilibrio es lenta, lo que da origen a sonidos parásitos al sucederse unas vibraciones a otras al efectuar el toque de la guitarra, sin que esta membrana hubiese vuelto a su sitio.

Para evitar los fenómenos señalados, se prepara la tapa superior con el llamado "abanico" (figura 1), que se forma haciendo una serie de hendiduras en dicha tapa, las cuales se cubren bien pegadas con madera fina y flexible, armando de esta manera la tapa como si estuviese provista de flejes en su interior, proporcionándola de esta manera una elasticidad tal, que inmediatamente de producirse la vibración, hace volver la membrana al estado de equilibrio, quedando así dispuesta para recibir otra y transmitirla de inmediato.

En el puente inferior situado en la parte más ancha de la caja, y equidistante de las partes inferiores de la embocadura y caja armónica,

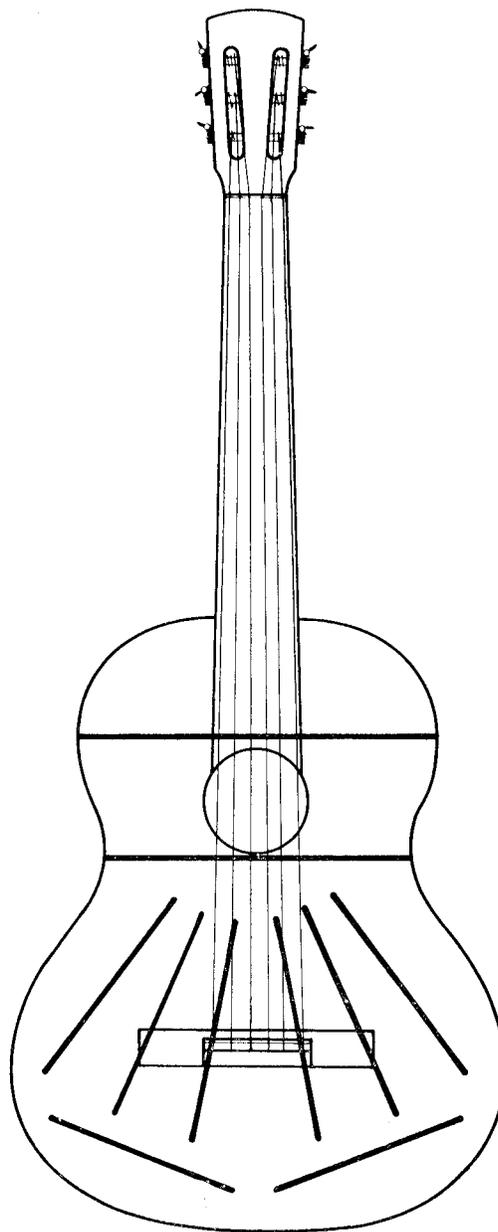


Figura 1.

existe una pequeña moldura de hueso donde se apoyan las cuerdas. Este puente tiene poca altura que nunca excede de un centímetro, y una anchura pequeña. Este puente va apoyado y sujeto a una moldura un poco más ancha y más larga, que es la que va pegada a la tapa de la caja, siendo así con el objeto de presentar mayor superficie de contacto y adherencia. Así quedan definidos los elementos que componen la guitarra.

3. La guitarra actual.

Para estudiar la forma, dimensiones y demás elementos de la guitarra, partimos de las consideraciones que nos proporcionan los sonidos armónicos e intervalos musicales, que nos van a producir ciertas limitaciones, con las cuales y la elección entre las dimensiones posibles de la longitud de la cuerda, tomada como la distancia entre la cejuela de hueso en que se apoya en el extremo del diapasón, y la pequeña moldura en que también se apoya situada en el puente inferior, son las que, en definitiva, nos van a condicionar el dimensionamiento de la guitarra y, por consiguiente, su geometría. Para ello, todas las dimensiones que obtengamos serán en función de L , que representa su longitud.

3.1. Sonidos armónicos.

Se llama sonido armónico de otro generador aquel que por resonancia nace de otro fundamental más grave.

Una cuerda al sufrir una acción vibra, pero lo hace no solamente en toda su extensión, sino también en partes alícuotas de su longitud, es decir, en mitades, terceras, cuartas, quintas partes, etc.

Por la fórmula de la vibración simple de la cuerda:

$$N \times L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{9,81 T}{P}}$$

N = número de vibraciones por segundo.

L = longitud de la cuerda, en metros.

T = tensión de la cuerda, en Kg.

P = peso por metro de la cuerda, en Kg.

Sabemos que el producto de sus vibraciones N por la longitud de la cuerda L es constante, puesto que son conocidas las características de la cuerda y la tensión de la misma. Por ello, al disminuir la longitud de la cuerda en sus diversas partes alícuotas que vibran, el número de vibraciones N que producen dichas partes aumenta, dando lugar en consecuencia, a notas más agudas que el sonido fundamental.

Si las partes alícuotas de la cuerda que vibran son: 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ..., las vibracio-

nes que producen están en la relación 1, 2, 3, 4, 5, ..., llamándose armónicos a estos sonidos producidos por vibración de partes de la cuerda, ya que las inversas de estas partes por estar en progresión aritmética forman la llamada serie armónica, y sus vibraciones están en la relación de los términos de esta serie, y, por consiguiente, son los armónicos naturales del sonido generador o fundamental.

El sonido musical es tanto más perfecto cuando se compone del fundamental al que se suman los parciales superiores; esta suma de sonidos, del fundamental con sus armónicos, determina la calidad que se conoce con el nombre de timbre, lo que permite distinguir por su sonido unos instrumentos musicales de otros, por la presencia de esos sonidos parciales variables en intensidad más o menos fuerte, ya que si los tonos fundamentales de cualquier instrumento fuesen aislados sin mezcla alguna de sus armónicos, no se podría distinguir unos instrumentos de otros, puesto que todos sonarían igual.

Si tomamos todas las partes alícuotas de la cuerda y ponemos debajo la relación de vibraciones que corresponden a dichas partes, podemos formar la escala o serie de los armónicos naturales:

1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8 ... Partes alícuotas.

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ... Relación de vibraciones.

En cualquier tratado de música y armonía se explica y representa con la escritura musical que los primeros armónicos producidos son todos consonantes con el sonido fundamental, pero a partir de la séptima nota inclusive los nuevos sonidos producidos por los armónicos situados en los números impares son disonantes.

En la séptima, duodécima, decimotercera y decimocuarta notas de la serie no se hallan exactamente a tono en la tonalidad del sonido generador; la séptima y, por consiguiente, la decimocuarta ($14 = 7 \times 2$) resultan demasiado bemolizadas y demasiado sostenida la undécima. El sostenido y el bemol al tener distinto número de vibraciones no representan el mismo sonido, aunque en la práctica musical se confunden hasta el punto de que en los instrumentos de sonidos fijos se emiten por medio de una misma nota. Los armónicos noveno y decimoquinto,

aunque impares, no son números primos ($9 = 3 \times 3$; $15 = 3 \times 5$), lo que dar lugar a armónicos que se llaman secundarios, que, como su nombre indica, su importancia es de orden inferior.

Todas estas consideraciones sobre los sonidos armónicos son las que hay que tener en cuenta en la construcción de los instrumentos de cuerda, al objeto de proporcionar sus formas que eliminen los armónicos disonantes, y de esta manera obtener los instrumentos con suficiente perfección para que tengan un buen sonido.

3.2. Intervalos musicales.

Cuando las vibraciones del sonido fundamental se doblan en la escala natural de armónicos que por división de la cuerda hemos obtenido, nos encontramos con el armónico de orden 2, y si los doblamos sucesivamente, vamos a tener siempre el mismo sonido, pero en un tono más agudo, que puede ser de orden n , si es que actuamos con el armónico 2^n .

El intervalo que existe entre un mismo tono y el inmediato superior nos produce dos notas con una separación grande, por lo que dicha separación la vamos a dividir en otros espacios armónicos más pequeños, para obtener una escala de notas por las que tengamos que pasar para llegar a la nota superior.

Apoyándose en el axioma musical que señala los sonidos más agradables al oído, como aque-

Tono	Notas	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
1	Vibraciones relativas	24	27	30	32	36	40	45	48
2		48	54	60	64	72	80	90	96
4		96	108	120	128	144	160	180	192

Observamos todavía que el intervalo de MI a FA es el más pequeño de todos con una diferencia de 2 unidades cuando en el resto es de 3 en tres de ellos, 4 en otros dos y 5 en una solamente. Al tomar la mitad de esos intervalos tenemos un llamado semitono que intercala-

DO	DO-RE	RE	RE-MI	MI	FA	FA-SOL	SOL	SOL-LA	LA	LA-SI	SI
24	25,5	27	28,5	30	32	34	36	38	40	42,5	45
48	51	54	57	60	64	68	72	76	80	85	90

llos armónicos expresados por los números más simples, vamos a construir esa escala.

Tomemos para ello la escala más simple con los números 1, 2, 3, 4, 5, y veamos cuántas combinaciones podemos hacer con ellos para pasar de 1 a 2, que es el número de vibraciones para elevar una nota a la tonalidad inmediata superior. El resultado de esas combinaciones tiene que resultar en todos los casos mayor que 1 y menor que 2, por lo que obtenemos la serie:

$$1, 5/4, 4/3, 3/2, 5/3, 2.$$

Al observar esos intervalos, vemos que los extremos 1 y $5/4$ y $5/3$ y 2 son mucho más grandes que los otros, que al resonar las notas correspondientes a ellos producirán disonancia, lo que exige intercalar entre esos espacios notas complementarias que sean acordes no con el sonido fundamental, puesto que hemos agotado esos números simples, sino con el sonido $3/2$ tomado como fundamental. Las relaciones de estos dos sonidos con el fundamental son $9/8$ y $15/8$.

Al intercalarlos tenemos la escala natural o diatónica expresada por las vibraciones relativas de cada nota y por los nombres que de todos son conocidos:

Nombres	DO	RE	MI	FA	SOL	LA	SI	DO
Razón de vibración.	1	$9/8$	$5/4$	$4/3$	$3/2$	$5/3$	$15/8$	2

Si multiplicamos por 24 operamos con números enteros, y tenemos las siguientes vibraciones relativas en los diversos tonos:

mos, ya que así las diferencias van a ser mucho menores, puesto que tendremos únicamente diferencias en 1,5, 2 y 2,5 que se aproximan mucho más, y así obtenemos la escala ascendente cromática con 12 tonos y semitonos ascendentes:

Los intervalos musicales que se conocen con sus nombres clásicos de segunda, tercera, cuarta, quinta, etc. se refieren a la posición de

la nota en la escala natural, por lo que podemos hacer la relación que sigue:

Relación vibración	Lugar de la escala	Notas	Denominación
1 : 2	8	Do-do	Octava
2 : 3	5	Do-sol	Quinta
3 : 4	4	Sol-do	Cuarta
4 : 5	3	Do-mi	Tercera mayor
5 : 6	Menos de 3	Mi-sol	Tercera menor
3 : 5	6	Sol-mi	Sexta mayor
5 : 8	Menos de 6	Mi-do	Sexta menor
1 : 4	2 × 8	Do-do	Doble octava
1 : 3	12	Do-sol	Undécima o quinta en octava

Podíamos seguir encontrando intervalos musicales, pero para el estudio que nos ocupa, son éstos únicamente los que vamos a poder emplear, por lo que no prolongamos más la escala.

Si hacemos vibrar la cuerda de un instrumento musical y escuchamos atentamente, percibiremos el sonido fundamental, un poco más débil la octava, después la duodécima, que en realidad es una quinta situada en el tono superior, la octava, y, en circunstancias favorables, la tercera mayor sobre esta última. Sucede, en efecto, que tan pronto como la cuerda empieza a vibrar, se divide en sus partes alícuotas, produciendo cada una de ellas su nota propia, aunque relacionadas todas con la nota fundamental. Pero los armónicos más elevados no se producen de ningún modo por haber construido el instrumento para que así suceda, o el oído no puede percibirlos por ser tan débiles, que hace necesario el auxilio de algo artificial.

Un instrumento musical de cuerda es aceptable cuando el sonido fundamental y los armónicos inferiores predominan en la nota; la calidad del instrumento es óptima si, además de darse la condición señalada, la combinación de armónicos está bien equilibrada al sumarse los intermedios hasta la sexta. Si, por el contrario, predominan los armónicos superiores sobre ella, la calidad del sonido es mala, áspera y dura, indicándonos que las condiciones exigidas para el dimensionamiento, los materiales o su construcción que debe ser esmerada, no han sido las adecuadas.

Como combinaciones agradables al oído y en orden decreciente armónico se encuentra, en primer lugar, el sonido generador, a continuación las octavas, las quintas bien justa o duodécima, es decir, la quinta en el tono superior, y en orden más bajo, la cuarta, terceras mayor y menor, y, finalmente, las sextas mayor y menor. El resto de las combinaciones, si es posible eliminarlas tanto mejor, puesto que no va a hacer otra cosa que perturbar.

3.3. *Los armónicos en la guitarra. Dimensionamiento de la misma sobre el eje de simetría.*

El estudio de los armónicos aplicado a la guitarra para que tenga las mejores condiciones de sonido por eliminación de los que no son adecuados, nos conduce a su dimensionamiento científico.

En una longitud de cuerda L , que es la que va a tener la guitarra y a partir de su extremo inferior, tomamos dos distancias, $L/3$ y $L/5$, y entre ambas situamos la embocadura. Para ello, trazamos una circunferencia con diámetro $L/3 - L/5 = L \times 2/15$.

De esta manera, hemos comenzado por suprimir todos los armónicos impares superiores, puesto que al ampliarse el sonido en la caja armónica y tener que salir por la embocadura, esos armónicos impares, a partir del número 5, van a producirse en una zona, en la que forzosamente han de colisionar con la tapa de la

caja, y, por otro lado, se refuerza su eliminación al ejecutar bien el toque, atacando las cuerdas donde se encuentran todos esos armónicos situados entre la embocadura y el puente inferior, que van a ser tapados con los dedos al picar o rasguear las cuerdas (fig. 2).

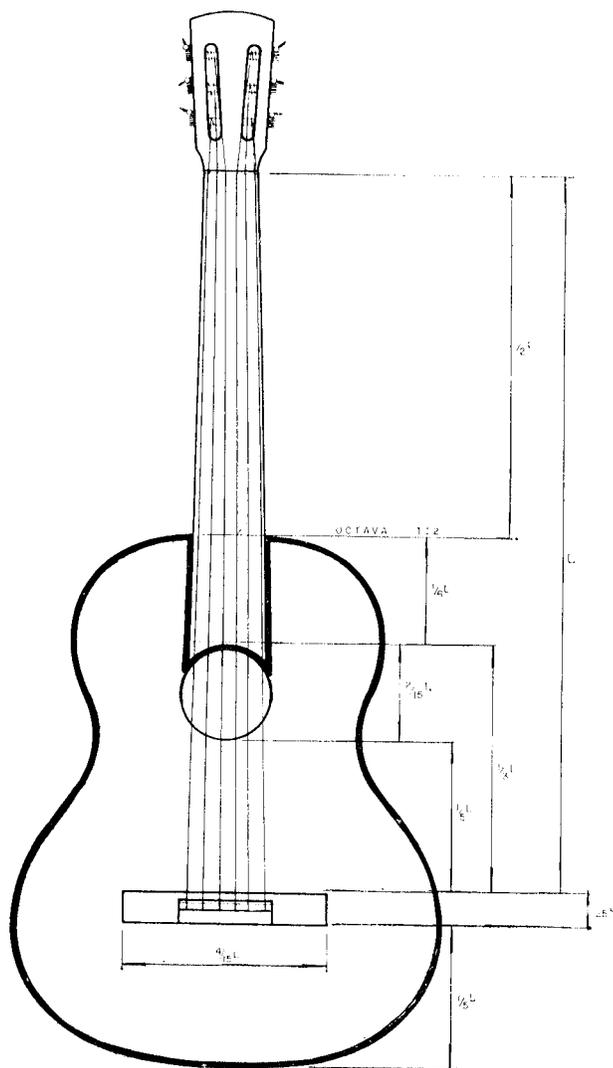


Figura 2.

Además del sonido generador o fundamental que se produce al vibrar toda la cuerda, al acortando la misma por pisar con los dedos los diversos trastes para señalar las diferentes notas, hay que considerar, dónde se nos sitúan las diversas combinaciones de armónicos en los intervalos musicales entre una nota y sus octavas, que para que exista un buen sonido deben

de producirse en la zona de la embocadura, que al ser ampliados por la caja de resonancia han de salir por la misma.

Llamando X a la distancia que se va acortando la cuerda, y R a la relación de vibraciones, se ha de cumplir lo que sigue:

$$R(L - X) < L/3 \quad ; \quad R(L - 5) > L/5$$

El valor de X ha de estar comprendido entre cero y $2/3$ de L , que es la longitud del diapasón, por lo que al obtener valores negativos hay que dar a X el valor cero, y si salen mayores de $2/3$ de L hay que dar este valor, ya que X debe de estar dentro del diapasón.

Para los diversos valores de R tenemos valores para X :

$R = 1/2$	Octava	$X = 4L/15$
$R = 1/3$	Duodécima	$X = 2L/5$
$R = 1/4$	Doble octava	$X = L/5$
$R = 2/3$	Quinta	$X = L/6$
$R = 3/4$	Cuarta	$X = L/9$
$R = 4/5$	Tercera mayor	$X = L/12$
$R = 5/6$	Tercera menor	$X = L/15$
$R = 3/5$	Sexta mayor	$X = 2L/9$
$R = 5/8$	Sexta menor	$X = L/5$

No existen, pues, armónicos impares superiores a 3.

Estas son todas las combinaciones posibles para los diversos valores de R , puesto que cualquier otra para armónicos superiores a los supuestos para R el valor de X es negativo, y, por tanto, asimilable a cero por tener que estar en el diapasón.

En un diagrama de barras con referencia al diapasón de la guitarra vemos cómo se suma el sonido generador a sus armónicos y en qué partes del mismo, lo que nos indica la composición que va a caracterizar su timbre para dar la calidad al tono que, con limpieza, se va a producir sin colisiones con la tapa superior al salir por la embocadura, cuando el sonido sea ampliado en la caja armónica (fig. 3).

Las zonas a definir en las que se componen los armónicos llevan todas ellas el sonido generador o fundamental, y todos o solamente algunos de los sonidos que más arriba hemos determinado para los diversos valores de R , de donde hemos deducido los de X :

Hemos visto que la situación de la embocadura es decisiva en la obtención de un buen sonido en la guitarra, y la posición elegida extraordinariamente buena por la eliminación de armónicos disonantes. El fijar la posición de la tarraja nos permite dimensionar la guitarra a todo lo largo de su eje de simetría, es decir, longitudinalmente:

- La longitud del diapasón es 2 L/3
- La longitud del puente superior a la caja armónica L/2
- El diámetro de la embocadura 2 L/15
- La distancia de la embocadura al puente inferior L/5
- Ancho del puente inferior (convencional). L/25
- Distancia del puente inferior al extremo de la caja L/5
(Ver fig. 2.)

3.4. Limitaciones mecánicas de la longitud de la cuerda.

En el esquema que se acompaña (fig. 4) está representado el diapasón de la guitarra con la nota que corresponde a cada cuerda en cada traste; también está representada la escala normal, indicando para cada tono y semitono el número de vibraciones por segundo que le corresponde, tomando como patrón el LA normal con 435 vibraciones por segundo.

Seguidamente presentamos la tabla de vibraciones que corresponden a la totalidad del diapasón de la guitarra, un poco ampliada por arriba y por abajo:

Octavas	0-1	0	1	2
DO	64,66	129,3	258,6	517,3
DO-RE	68,51	137,0	274,0	548,1
RE	72,58	145,2	290,3	580,7
RE-MI	76,89	153,8	307,6	615,2
MI	81,47	162,9	325,9	651,8
FA	86,32	172,6	345,3	690,5
FA-SOL	91,45	182,9	365,8	731,6
SOL	96,89	193,8	387,5	778,1
SOL-LA	102,6	205,3	410,5	821,1
LA	103,8	217,5	435,0	870,0
LA-SI	115,2	230,4	460,9	921,7
SI	122,1	244,1	488,3	976,5
DO	129,3	258,6	517,3	1.034,6

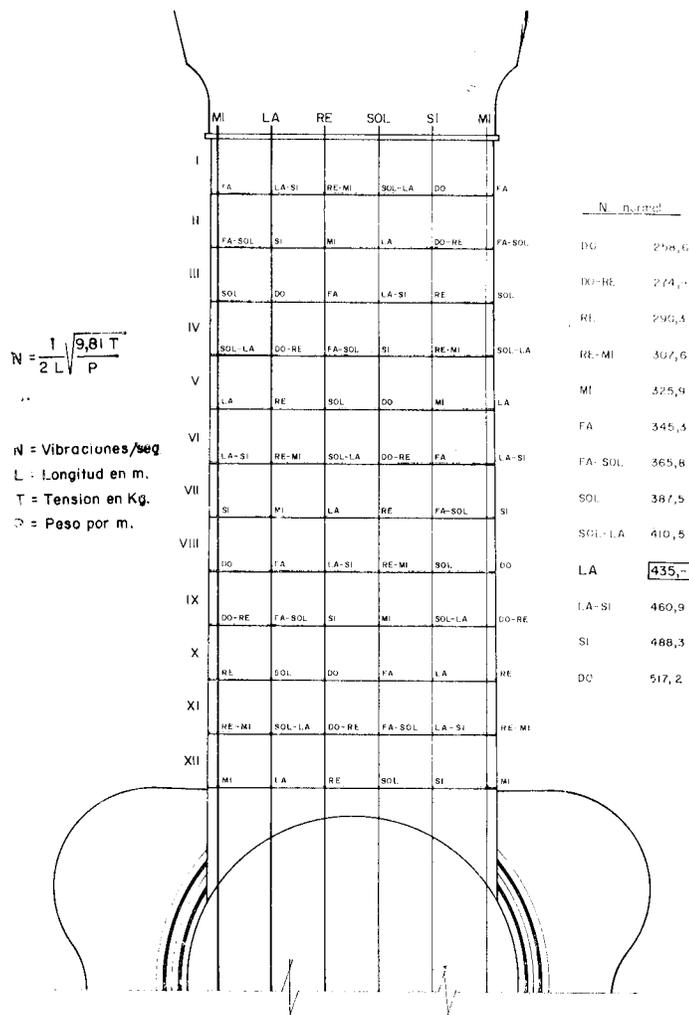


Figura 4.

Al marcar la vibración de cada cuerda al aire se ve inmediatamente la forma de afinar la guitarra. Simplemente basta con contar los tonos y semitonos de diferencia para pasar de una cuerda al aire a otra. Así, para pasar de la prima a la segunda, vemos que hay que bajar 5 puntos en la tabla, por lo que pisando en la segunda cuerda el quinto traste nos ha de dar el mismo tono que la prima al aire. Para la tercera cuerda y pisando en el cuarto traste tenemos que obtener la misma nota que en la segunda cuerda al aire, y para las demás se ve que cada una de ellas está rebajada en 5 puntos de la tabla respecto a la anterior, por lo que para obtener la nota de la superior al aire hay que pisar en el quinto traste.

Empleamos la ecuación simple de la vibración de una cuerda sujeta en sus extremos que anteriormente hemos presentado:

$$N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{9,81 T}{P}}$$

La cuerda prima al aire, cuando se pulsa, está dando el tono normal MI, que representa una vibración de 325,9 vibraciones por segundo. La segunda al aire da la nota SI en la escala descendente con 244,15 vibraciones por segundo, y así sucesivamente, la tercera, cuarta, quinta y sexta, que corresponden a los tonos descendentes SOL, RE, LA, MI, con vibraciones por segundo de 193,78; 145,15; 108,80 y 81,47, respectivamente.

Las cargas de rotura a tracción de las cuerdas han sido obtenidas en el laboratorio de la Escuela de Caminos, realizando los ensayos correspondientes.

De la fórmula se deduce que:

$$T = \frac{4 \times N^2 \times L^2 \times P}{9,81}$$

Aplicando la fórmula a las cuerdas de la guitarra, cuyos pesos de la cuerda son conocidos, tenemos;

Cuerda	P Kg/m	N	T Kg	Rotura a tracción Kg
1	0,0004206	325,90	18,215 L ²	15,50
2	0,0005663	244,15	13,764 L ²	17,80
3	0,0008949	193,78	13,627 L ²	21,30
4	0,0018946	145,15	16,276 L ²	14,70
5	0,0029795	108,80	14,289 L ²	16,40
6	0,0052165	81,47	14,121 L ²	18,10

Así, pues, las máximas longitudes que se pueden dar a una cuerda de guitarra vienen dadas por la tensión que corresponde a la carga de rotura, resultando como sigue:

Cuerda	Longitud
1	$L_1 = \sqrt{15,50 : 18,215} = 0,92 \text{ m.}$
2	$L_2 = \sqrt{17,70 : 13,764} = 1,13 \text{ m.}$
3	$L_3 = \sqrt{21,30 : 13,627} = 1,25 \text{ m.}$
4	$L_4 = \sqrt{14,70 : 16,276} = 0,95 \text{ m.}$
5	$L_5 = \sqrt{16,40 : 14,289} = 1,07 \text{ m.}$
6	$L_6 = \sqrt{18,10 : 14,121} = 1,13 \text{ m.}$

Como todas las cuerdas han de ser por definición de igual longitud, la máxima teórica, desde el punto de vista mecánico, que se puede dar a una cuerda de guitarra es de 92 cm, aunque al considerar un coeficiente de seguridad para no tener que tensar hasta la rotura, que podemos cifrar aproximadamente en el 10 por 100; la longitud máxima de cuerda que podemos admitir es de:

$$L = 83 \text{ centímetros}$$

La mínima tensión que se puede dar a la cuerda es de unos 5 Kg, ya que a partir de ahí se ha comprobado experimentalmente que, con tensiones más bajas de la cuerda no suena bien, pierde resonancia y cerdea, produciendo sonidos parásitos al chocar con los trastes por estar floja cada vez que se pulsa para que vibre. Así, para 5 Kg. de tensión obtenemos las siguientes longitudes:

Cuerda	Longitud
1	$L_1 = \sqrt{5 : 18,215} = 0,51 \text{ m.}$
2	$L_2 = \sqrt{5 : 13,764} = 0,60 \text{ m.}$
3	$L_3 = \sqrt{5 : 13,627} = 0,61 \text{ m.}$
4	$L_4 = \sqrt{5 : 16,276} = 0,55 \text{ m.}$
5	$L_5 = \sqrt{5 : 14,289} = 0,59 \text{ m.}$
6	$L_6 = \sqrt{5 : 14,121} = 0,60 \text{ m.}$

Con suficiente aproximación podemos tomar como mínima longitud de cuerda 51 cm, ya que aquí no es necesario el tomar un coeficiente de seguridad, puesto que el efecto de cerdeo se ha comprobado que con este límite no se pro-

duce, y el riesgo no es de la entidad del que determina la longitud máxima, que es el de la rotura.

La primera consecuencia que sacamos de lo señalado es que una guitarra debe de estar dimensionada para longitudes de cuerda comprendidas entre 51 y 83 cm. El salirse de estos límites entraña el riesgo de que si actuamos con longitudes inferiores a la mínima obtenida, la guitarra no suena bien, y si nos movemos en el límite superior, es posible que no podamos tener guitarra al no encontrar cuerdas para ella, por la razón de que se nos romperían las que pusiésemos por consiguiente, las condiciones mecánicas que hoy día nos limitan la longitud de la cuerda nos la sitúan en el dimensionamiento que sigue:

LONGITUD MAXIMA $L = 83$ centímetros

LONGITUD MINIMA, $L = 51$ centímetros

3.5. Situación de los trastes. Distancia entre los mismos.

Para ello volvemos a la fórmula de la vibración simple de la cuerda:

$$N = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{9,81 T}{P}}$$

Escogemos una cuerda cualquiera; por ejemplo, la prima, aunque con cualquier otra obtendremos los mismos resultados; esta cuerda al aire produce la nota MI, que se caracteriza por sus 325,9 vibraciones por segundo.

En la fórmula los valores de T y P se conocen para una longitud L de la cuerda al aire, por lo que $N \times L = K$ constante.

Para la cuerda al aire: $N = 325,9$ y $K = = 325,9 L$.

La colocación de los trastes vendrá dada por los diversos valores de L , al variar toda la escala de vibración de la prima pisando la cuerda desde el traste primero hasta el 18, y midiendo todos estos valores de L desde el puente inferior. Así, podemos situar los trastes.

La distancia entre dos trastes, que llamaremos d , vendrá dada por la diferencia entre las dos longitudes de cuerda que corresponden a esos trastes, que será:

$$d_n = L_n - L_{n+1} = K (1 : N_n - 1 : N_{n+1})$$

Aplicando la fórmula tenemos:

Traste	N	d
0	325,9	$0,05618 \times L$
1	345,3	$0,05289 \times L$
2	365,8	$0,04989 \times L$
3	387,5	$0,04712 \times L$
4	410,5	$0,04471 \times L$
5	435,0	$0,04211 \times L$
6	460,9	$0,03966 \times L$
7	488,3	$0,03741 \times L$
8	517,3	$0,03542 \times L$
9	548,1	$0,03337 \times L$
10	580,7	$0,03148 \times L$
11	615,2	$0,02972 \times L$
12	651,8	$0,02803 \times L$
13	690,5	$0,02653 \times L$
14	731,6	$0,02500 \times L$
15	775,1	$0,02356 \times L$
16	821,1	$0,02229 \times L$
17	870,0	$0,02102 \times L$
18	921,7	

3.6. La caja armónica.

De acuerdo con todo lo que hemos deducido en las páginas anteriores, sabemos que fijada una longitud de cuerda entre los límites que podemos hacerlo, que hemos llamado L , el dimensionamiento de la guitarra de arriba hacia abajo, es decir, en vertical, es completamente obligado en las longitudes que anteriormente hemos señalado y que seguidamente explicamos de dónde salen.

Desde el puente superior hasta el extremo superior de la caja de resonancia, hay $1/2 L$, por alcanzarse en ese punto la octava, con doble número de vibraciones que la cuerda al aire, y, por consiguiente, con longitud mitad.

Longitud desde el puente inferior hasta el extremo superior del círculo de la embocadura $1/3 L$, por la razón explicada anteriormente de eliminación de armónicos poco convenientes.

Desde el puente inferior hasta el extremo inferior del círculo de la tarraja $1/5 L$, por la razón explicada anteriormente para tapar los armónicos superiores.

Consecuencia de todo ello tenemos:

$$\text{Longitud del diapason} = L \left(1 - \frac{1}{3} \right) = \frac{2L}{3}$$

$$\text{Diámetro de la embocadura} = L \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5} \right) = \frac{2L}{5}$$

Al puente inferior se le suele dar una anchura que es la quinta parte de la distancia del puente inferior a la tarraja, o sea, $1/25 L$, y una longitud a cada lado del eje igual al diámetro de la embocadura que hemos determinado como $2/15 L$.

Finalmente, y en sentido vertical, a partir del extremo inferior del puente con ancho de $1/25 L$, se toma otra vez la longitud $1/5 L$, para alcanzar el extremo inferior de la caja armónica, quedando el puente en su totalidad simétricamente situado entre el borde inferior de la embocadura y el extremo de la caja, que está situado en su parte inferior, de acuerdo con lo explicado en los elementos constituyentes de la guitarra. La razón de que sea así es que el centro del puente es prácticamente el de gravedad de la parte de la caja situada debajo de la embocadura.

La figura 2 indica el dimensionamiento que se ha explicado.

La forma de la guitarra, en lo que a su caja se refiere, tiene forzosamente que ser simétrica con respecto al eje vertical a que nos venimos refiriendo, puesto que la ampliación del sonido en dicha caja producido por las vibraciones de las cuerdas situadas en forma simétrica, también lo ha de ser.

Para determinar su forma es necesario el partir de dos premisas. Una de ellas es la que tiene por consecuencia el fenómeno de la vibración de las cuerdas, y su transmisión por el puente inferior a la tapa superior de la caja armónica, al considerar dicha vibración como producida en un solo punto, puesto que dada la proximidad de unas cuerdas a otras es una hipótesis de partida muy cerca de la realidad, con un margen de error muy pequeño. La otra premisa que admitimos viene dada como consecuencia de la suma de los sonidos armónicos al fundamental, lo que determina la calidad del sonido, que se conoce con el nombre de *timbre*, característica tan fundamental que distingue a la guitarra.

Existe otra condición de enorme importancia para mantener la actual forma de la guitarra, que es el tiempo de mantenimiento del sonido, que más adelante se explica con todo detalle.

Ahora vamos a ver cómo se dibuja la caja de la guitarra solamente con regla y compás (figura 5).

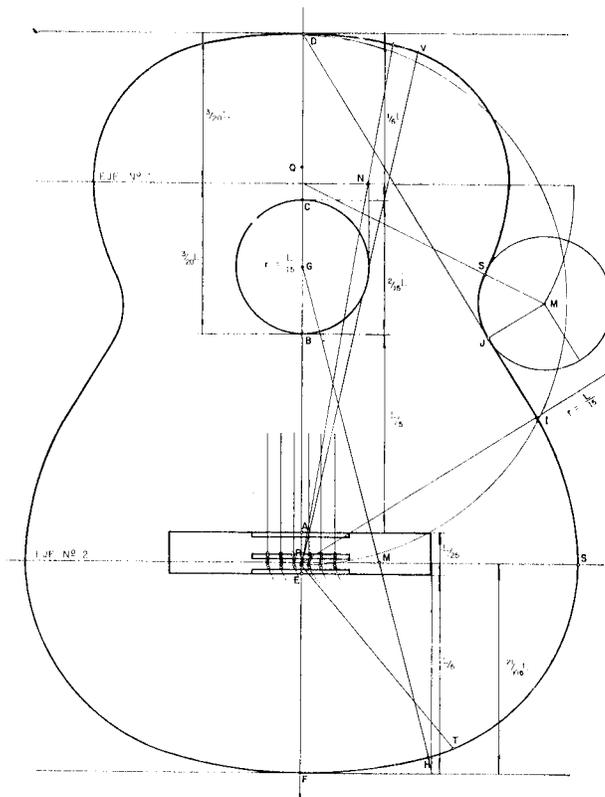


Figura 5.

Consideramos un eje vertical dimensionado como hemos explicado anteriormente, en el que hemos situado los dos extremos de la caja, la embocadura y el puente inferior. Dividimos la caja en dos partes por una horizontal que pase por el extremo inferior de la embocadura.

La parte superior así determinada la dividimos en dos partes iguales, y en el punto de ese eje vertical que delimita esas dos partes trazamos una horizontal que es uno de los ejes fundamentales de la guitarra, eje número 1.

En la parte inferior, el punto medio cae exactamente en el centro del puente inferior, cuyo ancho ya hemos dicho que suele ser de $1/25 L$. Este puente por ese punto queda dividido en dos partes: una superior, que en su extremo lleva una pequeña cejuela de hueso donde se apoyan las cuerdas; la otra parte, la inferior del puente, lleva otras dos cejuelas, una en el centro y otra en el extremo inferior. Debajo de ambas, y perforando la madera del puente, hay un orificio para cada cuerda, para anclarlas y anudarlas en la mitad inferior del puente, abar-

cando las dos cejuelas citadas; por ello el punto de vibración a que nos hemos referido anteriormente como una de las premisas o hipótesis de partida es el que está situado en el centro de la mitad inferior del puente, punto sobre el que trazamos una horizontal, y así tenemos el segundo eje fundamental de la guitarra, el número 2, que nos sirve para diseñar su caja de resonancia. Lo hacemos para la mitad, ya que por simetría obtenemos el resto.

Trazamos un eje vertical y situamos un punto en el que llamamos A, y de abajo hacia arriba situamos las magnitudes que siguen (fig. 5).

- Punto A, situado en el extremo superior del puente inferior.
- Punto B, a $1/5 L$ de A.
- Punto C, a $1/3 L$ de A.
- Punto D, a $1/2 L$ de A.

Así obtenemos los dos extremos de la embocadura y el extremo superior de la caja.

Ahora, y midiendo hacia abajo a partir del punto A, tomamos las magnitudes que siguen:

- Punto E, a $L/25$ de A.
- Punto F, a $L/5$ de E.

Así situamos el extremo inferior del puente y de la caja de resonancia.

Ahora podemos situar los dos ejes fundamentales:

- Eje número 1, situado en la mitad de BD —punto Q.
- Eje número 2, situado a $1/4$ de EA a partir de E —punto P.

Seguidamente, trazamos la embocadura dibujando una circunferencia con diámetro BC; también dibujamos el puente inferior, dando a ambos lados de A, en horizontal, una longitud igual al diámetro de la tarraja BC igual a $2/15 L$.

A continuación proyectamos el diámetro horizontal de la embocadura sobre el eje número 1, y sobre la horizontal que pasa por el extremo inferior de la caja la longitud del puente.

Unimos el centro de la tarraja G con uno de los extremos de la proyección del puente; su intersección con el eje número 2 nos da el punto M.

Unimos igualmente el punto P, situado en el eje número 2, donde suponemos concentradas las vibraciones con el punto N, extremo de la proyección de la tarraja sobre el eje número 1.

Dos carpaneles con cuatro centros nos determinan el contorno de las partes superior e inferior. El de la parte superior tiene sus centros en el punto P el N y su simétrico, y un cuarto centro en el punto Q. El de la parte inferior están sus centros en el de la tarraja G en el M y su simétrico, y en P.

Desde el punto D extremo superior de la caja trazamos tangentes al círculo trazado con centro en P, cuyo punto de tangencia está representado en I.

Finalmente, se traza un círculo tangente a la tangente citada trazada desde D y al círculo trazado con centro en Q que forma parte del carpanel superior, dándole un radio igual al de la tarraja, con lo cual hemos completado el contorno de la caja armónica.

El situar esta circunferencia tangente es sencillo basta trazar una circunferencia concéntrica a la trazada con centro en Q con un radio igual al primitivo aumento en el de la embocadura $1/15 L$, y por el punto I de contacto a una distancia de $1/15 L$, una paralela a la tangente BI. El punto de intersección de la circunferencia con la recta en ese lado nos da el centro de la circunferencia de acuerdo.

Con ello queda dibujada con regla y compás la caja de resonancia de la guitarra, por lo que puede ser construida. Ahora vamos a ver cómo funciona.

Hemos partido de la hipótesis muy aproximada a la realidad, de que las vibraciones de las cuerdas es como si estuviesen concentradas en un punto P, que al transmitir una nota hace vibrar la membrana que es la tapa de la guitarra, ampliando el sonido para darle salida por el círculo de la embocadura. La propagación de la onda sonora no es más que un movimiento de traslación de las moléculas de aire que, en cada instante parten de dicha onda, y se transmite en forma parecida a la que se produce en un estanque cuando lanzamos una piedra al agua.

Al solicitar la cuerda sometida a una tensión determinada, como se ha visto anteriormente, se produce un movimiento ondulatorio en la misma dirección de la cuerda, dando lugar a

ondas longitudinales que se comunican al extremo de la misma anclada en el puente inferior y que por el mismo, transmite a la caja armónica ondas transversales semejantes a las producidas en la superficie tranquila de un estanque al lanzar una piedra.

Estas ondas sonoras transversales con características que fácilmente pueden determinarse, nos permiten explicar la razón de la hipótesis adoptada de la vibración partiendo de un punto P en todas direcciones.

Al producirse una nota, sabemos las vibraciones por segundo que tiene, por lo que podemos obtener su longitud al relacionarla con la velocidad del sonido. Por la tensión de la cuerda también conocida, y por las constantes mecánicas de la misma, se puede conocer la amplitud, elongación y cuantos detalles se quieran de dicha onda.

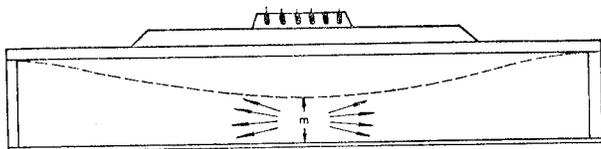


Figura A.

Esquemáticamente se ha representado un corte de la caja de la guitarra por el puente inferior que recibe la vibración. La línea de puntos representa la forma de la deformación que va a sufrir la tapa dado su fino espesor al recibir la vibración.

Al ser mayor la deformación en el centro, es donde el aire de la caja recibe mayor presión, tendiendo a escaparse hacia los lados como se ha indicado con las flechas. Esto que se ha presentado para una sección, sucede para otra cualquiera producida por un plano normal a la caja pasando por P, y como consecuencia, la hipótesis de que la vibración producida que da lugar a la onda sonora se puede dar con mucha aproximación como partiendo de P. Este razonamiento también explica la formación del abanico que más adelante detallamos.

El sonido se refleja y refracta exactamente como la luz, pudiendo incluso desviarse y la onda sonora contornear los obstáculos, aunque éstos apaguen en parte el sonido o le hagan sombra como en la luz, es decir, que le hagan desaparecer.

Así, pues, en la caja de la guitarra, una vibración en el punto P hace aparecer en el mismo y en todas direcciones la onda sonora que, para estudiar cómo se transmite, podemos identificarla como una parte infinitesimal materializada en un rayo, es decir, una línea recta sin espesor que partiendo de P en todas direcciones, choca con las paredes de la caja de la guitarra, se refleja una o varias veces hasta que el rayo reflejado pasa por debajo de la embocadura y sale al exterior, produciéndose el sonido en el lugar que estaba previsto como el mejor.

Examinemos, pues, lo que sucede. Vamos a estudiarlo en media guitarra, puesto que en su parte simétrica es exactamente igual. Un rayo partiendo de P hacia abajo y moviéndose en sentido contrario a las agujas de un reloj avanza desde F hasta H; el ángulo del rayo reflejado con el incidente va aumentando desde cero hasta alcanzar el máximo cuando el rayo incide en el punto H. Hay en el espacio de F a T una primera zona donde el rayo reflejado corta al círculo de la embocadura hasta ponerse tangente a la misma, teniendo una sola incidencia y reflexión; a partir de ese instante aumenta el ángulo y el recorrido, puesto que hay dos incidencias y dos reflexiones para alcanzar la tarraja hasta que se llega al punto H, en que el ángulo y el recorrido es máximo con varias incidencias y reflexiones. A partir de H, el ángulo y el recorrido van disminuyendo hasta alcanzar una zona en que el rayo con una sola incidencia y reflexión se pone tangente a la embocadura que, al seguir avanzando, la corta hasta alcanzar la tangencia en el otro extremo y seguir aumentando el recorrido hasta llegar a S.

Desde S hasta I tenemos casos anteriores, puesto que el rayo que parte de P incide y se refleja volviendo a P para seguir su trayectoria en sentido contrario.

Desde I a J aumenta el recorrido hasta entrar en la curva de la garganta de la caja, en que en la primera parte es pequeño con una sola incidencia y reflexión, hasta aumentar seriamente, alcanzando su máximo recorrido en el vértice del círculo de la garganta. Después sigue disminuyendo el recorrido, para terminar sin ninguna incidencia y reflexión, puesto que alcanza la embocadura de manera directa.

Las zonas limitadas en que la onda incide

en ellas da lugar al mismo número de reflexiones, tienen un recorrido que varía entre límites muy pequeños que se pueden despreciar. Es posible su cálculo matemático, por el que se podría determinar los números exactos de los que más adelante vamos a disponer, y que obtenidos experimentalmente, resulten suficientemente aproximados para nuestros fines; otra cosa se saldría de este intento, puesto que entraría a formar parte de la resolución de problemas geométricos que, como ejercicio para

Sectores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Recorridos $\times L$	0,7	1,2	1,5	5,0	1,2	1,5	0,7	1,9	1,2	5,0	4,0	4,0
Grados	14	8	9	4	3	5	17	4	5	3	6	12

Sectores	13	14	15	16	17	18	19	20
Recorridos $\times L$.	4	4	5	1,2	1,9	3	1,9	4
Grados	12	6	3	5	5	8	4	5

Sectores	21	22	23	24	25	26	27
Recorridos $\times L$.	0,7	4,8	3	2,1	1,2	0,7	0,25
Grados	5	3	4	1	8	8	13

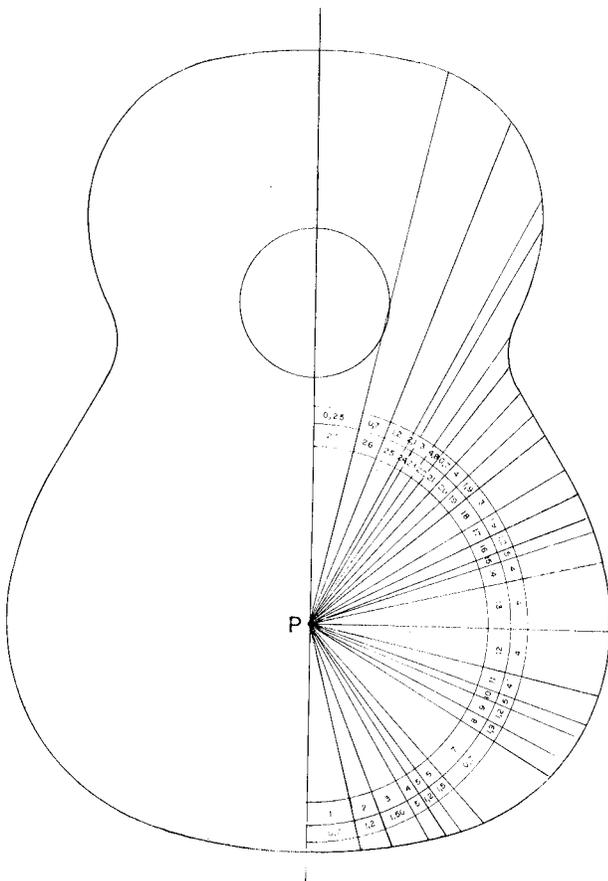


Figura 6.

los estudiosos sería bueno para un examen, que obligase a soluciones más exactas que se podrían aprovechar, pero que, en definitiva, para las conclusiones a que llegaremos, no tendrían demasiado valor.

Se acompaña un gráfico obtenido experimentalmente, en el que se ha dividido la guitarra en varios sectores desde P, indicando los diversos recorridos en que un rayo partiendo de dicho punto alcanza la embocadura después de varias incidencias y reflexiones (fig. 6).

Resumiendo por suma de los que en cada sector tienen igual recorrido.

Recorridos $\times L$.	0,25	0,7	1,2	1,5	1,9	2,5
Grados	13	44	30	14	13	9
%	7,22	24,44	16,67	7,78	7,22	5

Recorridos $\times L$.	3,2	4	4,8	5
Grados	28	16	6	7
%	15,56	8,89	3,33	3,89

3.7. Sostenido de las notas en la guitarra; limitación musical de la longitud de la cuerda; razón de la forma de la caja armónica.

De todos es sabido que la velocidad del sonido en el aire como el que se encuentra en la caja de resonancia de la guitarra es de 1.000 metros en tres segundos, valor con suficiente aproximación para nuestros comentarios.

Al producirse la vibración de la cuerda y transmitirla para su ampliación en la caja armónica, actuando como si se hiciese una presión en un punto determinado de su tapa, se produce una onda sonora que se propaga en todas direcciones que, partiendo de ese punto, incide y se refleja en las paredes de la caja de la guitarra al chocar con ellas, hasta alcanzar el círculo de la embocadura.

Esta onda sonora no tiene un recorrido continuo aumentando o disminuyendo su valor, sino que se produce con saltos bruscos, puesto que de un punto a otro inmediato puede pasar de un número de incidencias y reflexiones para alcanzar la embocadura, a otro completamente distinto con recorrido muy diferente.

La distribución de recorridos y porcentajes de los mismos, ha sido dada anteriormente, viendo que varía de un mínimo de $L \times 0,25$ a $5L$ de acuerdo con la figura 6 a que nos hemos referido, así que al tener en cuenta la velocidad del sonido, la vibración producida que da lugar a la nota musical, lo hace por un tiempo de $5L \times 3/1.000 = 0,015 L$ hasta alcanzar la embocadura, que es el máximo que se puede obtener.

Esta es una de las características fundamentales de la guitarra que, además de su timbre, sostiene el sonido de las notas que produce durante $0,015 \times L$ segundos, justificando con ello en parte su forma, ya que su total justificación viene dada por la manera de sostener el sonido.

El tener en cuenta el fenómeno que así se produce es de la mayor importancia, puesto que se ha comprobado que un tocaor con manos rápidas al emplearlas en la ejecución del toque, con mucha facilidad y solamente con simple golpe de muñeca al que acompaña un rasgueado, es capaz de alcanzar con cuatro dedos las seis cuerdas de la guitarra en $1/3$ de segundo, dando lugar a que en tan corto espacio de tiempo haya habido una vibración de las seis cuerdas cuatro veces, por lo que corresponde a una sola de ellas un tiempo de $1/3 \times 1/6 \times 1/4 = 1/72 = 0,01389$ segundos en producir una nota.

Si el tiempo en que la nota está sostenido en la guitarra es superior al que hemos considerado que alcanza un tocaor al hacer vibrar una cuerda, podría dar lugar a que se solapasen sonidos con superposición de notas unas encima de otras, produciendo efectos disonantes y malos resultados musicales.

Para eliminar este posible problema, si el límite de tiempo en que la nota se sostiene en la guitarra, lo asimilamos al que un tocaor puede llegar a obtener, tenemos que dar a la cuerda para que esto se produzca en una longitud determinada que, en definitiva, es una limitación que podemos llamar musical y que nos conduce a situarnos en un dimensionamiento más estricto que el obtenido en el estudio mecánico de las cuerdas de la guitarra.

Todavía es preciso afinar un poco más puesto que el actuar con seguridad, nos obliga a tomar un margen sobre el tiempo que hemos señalado a que llega el tocaor pulsando las cuerdas, puesto que es preciso considerar la posibilidad, que siempre la hay, de que surjan tocaores de manos rápidas, como lo fueron en su día Luis Yance o Sábicas, y, actualmente, Paco de Lucía, que puedan producir tiempos inferiores a los indicados.

Así tenemos que igualar el tiempo que se sostiene una nota en la guitarra de $0,015 \times L$ segundos, con el que puede obtener un tocaor que hemos calculado de $0,01389$ segundos que, para mayor seguridad, como hemos explicado anteriormente, limitamos dicho tiempo en el 80 por 100 de su valor como medida de seguridad, con lo que obtenemos un tiempo de $0,8 \times 0,01389 = 0,01111$ segundos que nos conduce a una longitud de cuerda máxima como sigue:

$$0,015 \times L = 0,01111$$

$$L = 0,74 \text{ metros} = 74 \text{ centímetros}$$

Para valor mínimo podemos tomar un valor próximo pero inferior; parece prudente el 70 por 100 de $0,01389$, resultando $0,009723$ segundos, por lo que el valor mínimo de L será:

$$0,015 \times L = 0,009723$$

$$L = 0,65 \text{ metros} = 65 \text{ centímetros}$$

Continuando ahora para completar los que podríamos llamar invariantes de la guitarra, es decir, sus características fundamentales con valor permanente, consideramos la forma de sostener el sonido, puesto que de ella depende lo que se puede llamar la viveza o brillo del mismo.

Ya hemos visto anteriormente las zonas del perímetro de la guitarra, con los recorridos que tiene lugar hasta alcanzar la embocadura, de un rayo que incida en ellas partiendo del punto en que produce la vibración y que hemos resumido como sigue:

Recorrido $\times L$	0,25	0,7	1,2	1,5	1,9	2,5	3,2	4	4,8	5
Desarrollo en grados.	13	44	30	14	13	9	28	16	6	7

El tiempo en segundos que el sonido tarda en hacer cada recorrido, es el producto de multiplicar dicha distancia por $3/1.000$.

La onda sonora al producirse, partiendo de un punto, se desarrolla según todos los posibles radios de un círculo abarcando los 360° , por lo que los grados que comprende cada recorrido los reduciremos al tanto por ciento del total que en nuestro caso, habría que multiplicar por el factor $100/180$.

Con ello, podemos representar la curva que relaciona los tiempos en que se produce la onda sonora con la cantidad de la misma, correspondiente a cada recorrido.

Basta para ello el tomar en un eje los recorridos como los hemos expresado más arriba, e igualmente en otro los grados. Las escalas de representación para tiempos en segundos será de $3L/1.000$, y la de ordenadas, de $100/180$.

Así, obtendremos la forma de distribución del sostenido de las notas, y su brillantez por el producto del tiempo por el desarrollo de la zona, es decir, por el área de la curva y el eje de tiempos, que por no ser continua no es preciso integrar, sino que la suma de la superficie de unos simples trapecios nos ha de dar la total.

Consecuencia de todo lo señalado, una guitarra se caracteriza y da razón de su forma por los siguientes invariantes:

1. Longitud de cuerda comprendida entre 65 y 74 cm.
2. Distribución de armónicos, con ausencia de todos los impares superiores a tres.
3. Sostenimiento del sonido al producir una nota por un tiempo de $0,015 \times L$ segundos.
4. Forma de distribuir el sonido como se indica anteriormente, y que da lugar a un brillo determinado. Más adelante se representa.

Estos son los cuatro invariantes que por comparación podemos decir que constituyen la *personalidad de la guitarra* que la caracteriza totalmente, de la misma forma que a las personas sus huellas dactilares y cromosomas.

3.8. *El abanico.*

En dos partes de todo este estudio se ha hablado del abanico, una de ellas en la descripción de los elementos de la guitarra, en que muy sucintamente se ha explicado para qué servía, y otro en las consideraciones hechas al hablar de la caja armónica.

Ya se ha dicho que la vibración de la cuerda que produce un movimiento oscilatorio armónico es longitudinal, y al transmitirse por un extremo a través del puente inferior a la caja armónica, da lugar a una onda sonora transversal con su longitud, su elongación y amplitud, cifras que pueden conocerse al saber las circunstancias en que se producen, puesto que las vibraciones que caracterizan una nota, las condiciones necesarias, longitud y tensión de la cuerda son de sobra conocidas.

Así, en el punto *P* del puente inferior en que va a tener lugar la transmisión de la vibración, de hecho se va a realizar una solicitud sobre la tapa superior de la caja, en la misma forma que si actuase una fuerza en ese punto, sometiendo a la membrana sujeta en sus bordes y en los dos pequeños travesaños de madera que limitan la embocadura, a una flexión con su correspondiente deformación.

De acuerdo con la ley de Hooke, en que las tensiones son proporcionales a las deformaciones y que según la teoría de la elasticidad que, con bastante aproximación resulta cierta, desaparecida la tensión también desaparece la deformación por volver al estado de equilibrio, y para que esto se cumpla, se emplea el abanico, significando que éste no va a satisfacer ninguna cualidad musical, sino que su función es totalmente mecánica, aunque como consecuencia de ello, si dicha función no se cumple, la del instrumento al que ha de servir, y por consiguiente su sonido, tampoco se cumple.

Se escucha con frecuencia que sin el abanico las guitarras no suenan, pudiendo pensar que dicha disposición es como una de las características musicales de la guitarra y nada más lejos de su realidad.

Dos figuras nos van a explicar su proceso (figuras 7 y 8).

En la figura 7 está representada la guitarra y el reverso de la tapa superior en que se han señalado el abanico y los pequeños travesaños que encuadran la embocadura.

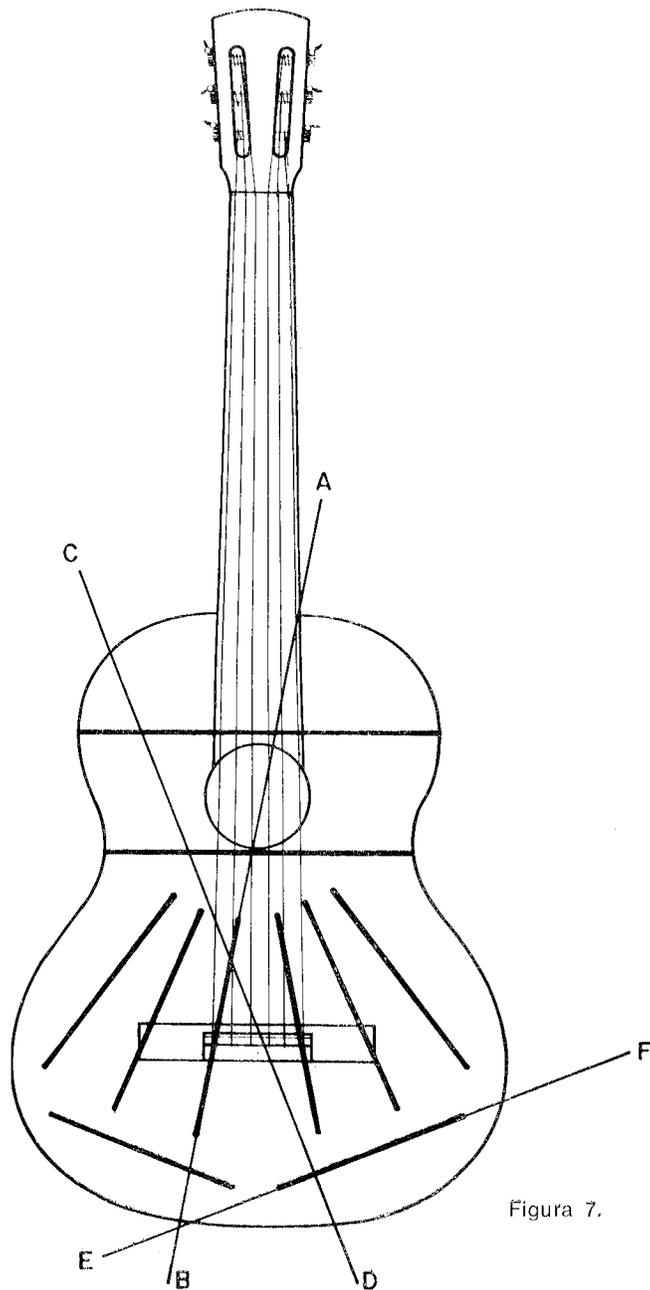


Figura 7.

Hemos trazado tres ejes: AB, CD y EF; sobre dichos ejes hemos dibujado, aproximadamente, los perfiles que se obtienen cortando la caja de la guitarra por los mismos. En la figura 8 se han representado dichos perfiles, así como la deformación que se produce al ser solicitada la membrana en un punto por la transmisión de una onda transversal.

La luz de la tapa superior entre dos apoyos respecto a su espesor es desproporcionada, puesto que muy aproximadamente está en la

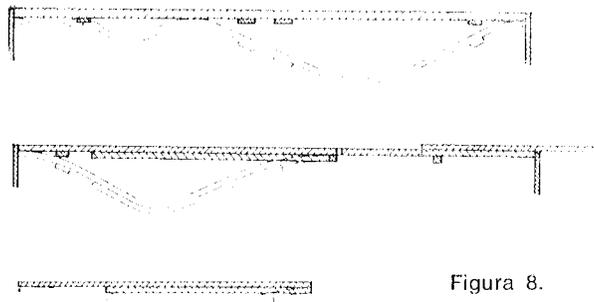


Figura 8.

razón de 1 a 200 o más, por lo que puede producirse una deformación permanente y dar lugar a que no exista reacción suficiente para volver al estado de equilibrio y resistir una nueva onda sonora que tiene que transmitir ampliada, que como consecuencia podría resultar el que la guitarra no sonase.

Este es un efecto mecánico por las condiciones de luz y espesor que, para obviarlo es justamente el objeto de construir el abanico.

En definitiva, se trata de armar la tapa de la guitarra con unas tiras de madera que aumenten en zonas la inercia de la tapa de la caja armónica, para mejor soportar el momento flector, y así dar lugar a que al flexionar la tapa se produzca una reacción que rápidamente la haga volver al estado de equilibrio, sin quedar con deformación permanente.

El cálculo del espesor que debe darse a esas maderas que actúan como nervios es de fácil resolución mecánica. Por las vibraciones de las notas musicales que se conocen, por la tensión de la cuerda y sus características principales, y por las ecuaciones del movimiento vibratorio armónico, se puede deducir la amplitud de la onda y, por consiguiente, la sollicitación.

Conociendo el espesor de la tapa, se calcula la máxima flexión para la mayor sollicitación, que ha de corresponder a la mayor vibración, y así reforzar la sección o espesor de la tapa con unas finas molduras, para resistir el momento flector y que la reacción que produzca sea suficiente para que no quede deformación permanente, por volver con la mayor celeridad al estado de equilibrio, y así poder resistir otra sollicitación que no interfiera con la anteriormente producida y dé lugar a sonidos apagados o poco modulados.

Vista la función mecánica que ejerce el abanico para adecuar la flexión de la membrana

que constituye la tapa de la caja armónica, que a su vez presionando el aire que existe en su interior amplía y transmite el sonido, resulta que por el razonamiento empleado de la forma de actuar los nervios de ese abanico, parece ser que sería mucho más eficaz si se le cambian de situación, respetando la longitud total actual poniéndole en sentido radial partiendo del punto P de donde van a partir las vibraciones que haría mucho más racional el trabajo de ese abanico, siendo en definitiva factor importante que, teóricamente por funcionar mejor el conjunto, daría lugar a sonidos con mayor limpieza.

En la figura 9 se dibuja cómo en teoría se debería armar ese abanico, aunque por el momento sus resultados se desconocen, puesto que para establecer una comparación, sería necesario construir una tapa superior de la guitarra en estas condiciones.

3.9. Altura de la caja armónica.

La altura o espesor de la caja de resonancia de la guitarra, se suele tomar en magnitud igual

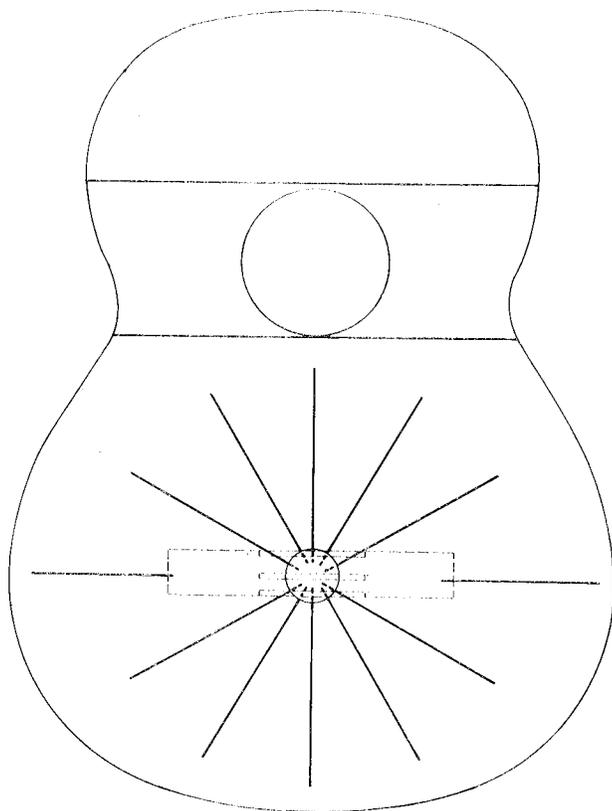


Figura 9.

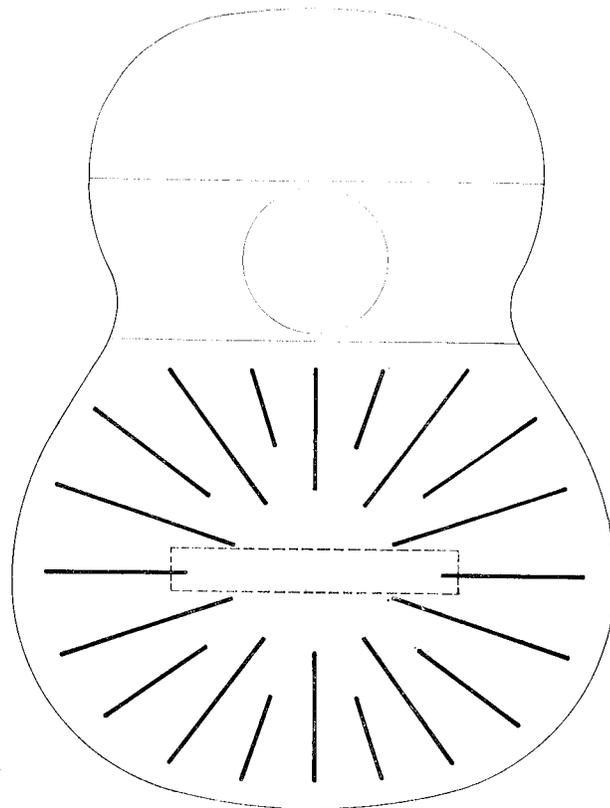


Figura 9-1.

a la distancia del ejemplo 1 al extremo superior de la caja, o al borde inferior de la emboadura, puesto que es lo mismo.

$$\text{Altura} = QD = QB = 3L/20$$

Este espesor de la caja sólo tiene por objeto el que haya más o menos aire en la cámara, y por consiguiente aumentar o disminuir el volumen del sonido, puesto que la dimensión mayor o menor que se adopte no ha de intervenir en modificar los factores hasta ahora considerados. La altura dada es la normal que hoy día tienen las guitarras para toque flamenco, ya que las que se emplean para música clásica, suelen tener mayor espesor para dar más volumen de sonido en los conciertos.

4. Otras consideraciones.

Finalmente, y tratando de esta guitarra clásica, no tenemos más remedio que hablar de cómo se mueve este mundo de su construcción y comercio.

Los constructores de guitarras hasta la fecha, con muy poca variación, hacen esos instrumentos en un modelo de dimensiones estándar, con una longitud de cuerda que se aproxima o iguala a los 66 centímetros, y que produce un tiempo de 0,0099 segundos de sostenido de la nota, viéndose con ello que por intuición se han movido en una seguridad grande, acercándose o quizá identificándose con el límite más seguro de menor longitud posible de cuerda.

Cualquier artista que desee adquirir una guitarra, normalmente ha de escoger entre las ya construidas con una misma dimensión, o bien esperar a que se la construyan con más esmero y mejores o peores materiales y fantasías, pero sin salirse de una medida.

Esto no debía de ser así, puesto que se puede hacer una guitarra de artesanía como son las buenas y afamadas que se construyen, a la medida del que la va a tocar, ya que hasta ahora se opera en forma semejante a la que se podría dar, si las personas que pudiesen elegir para vestirse entre diferentes modelos, tuviesen que conformarse con una sola talla por no haber otra.

Para tomar a un artista la medida de la guitarra que le va bien, sería preciso el tomar la velocidad máxima de su pulsación en el toque, para lo que existen hoy día medios más que suficientes en el campo de la electrónica.

En los lugares que se venden las guitarras debían de tener los medios para tomar la medida de la pulsación del guitarrista, y así poderle proporcionar la guitarra que le corresponda con la longitud de cuerda adecuada, bien construyéndosela a medida, o proporcionándole la talla adecuada, de la misma forma que se hace con las prendas de vestir en los grandes almacenes.

Como la realidad es mucho menos perfecta, y generalmente no existe más que un solo tipo de guitarra, éste debía de hacerse con el patrón mayor, es decir, con la mayor longitud de cuerda posible, unos 73 ó 74 centímetros, puesto que serviría para todos con mayor eficacia, al aceptar en las mejores condiciones la mayor pulsación. Todo ello no supondría más que un aumento en las dimensiones de unos 6 ó 7 centímetros, y una embocadura con un diámetro superior en poco más de un centímetro respecto a los modelos actuales.

5. La guitarra elíptica.

Durante siglos la guitarra ha estado evolucionando en su forma pero siempre dentro de un patrón determinado que ha dado como consecuencia la guitarra actual con una planta difícil con numerosas curvas que produce para la onda sonora un tortuoso recorrido por el interior de su caja armónica. A la vista de ello, parece sugestivo el contemplar la posibilidad de cambiar la forma de su caja de resonancia, no en la manera que lo hizo Antonio Torres, mejorando las ya establecidas curvas de la guitarra, sino estudiando una nueva forma que resulte más simple, para que la onda sonora no recorra un camino tan complicado, y que por consecuencia el sonido que se vaya a escuchar sea cuando menos de parecida calidad al de la guitarra clásica.

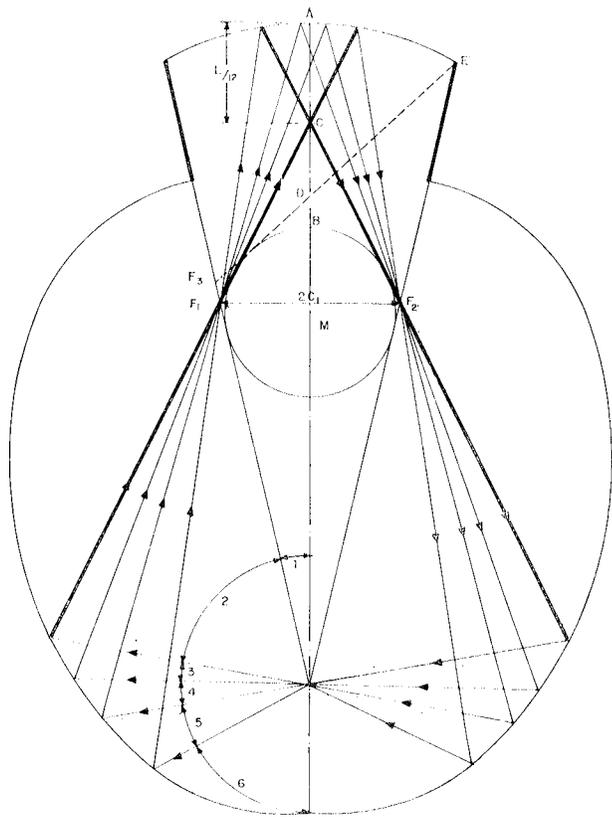
Aprovechando la propiedad de la elipse, de que un rayo partiendo de un foco al chocar con el contorno de la elipse se refleja pasando por el otro foco, vamos a tratar de diseñar una caja armónica compuesta por tres elipses, en que dos a dos tengan un foco común. Uno de los focos lo situamos en el punto P , de donde va a partir la vibración, punto bien conocido situado en el puente inferior al que tantas veces nos hemos referido, y los otros dos en dos puntos simétricos F_1 y F_2 situados en las tangentes trazadas desde P a la circunferencia de la embocadura.

Para determinar los dos focos F_1 y F_2 , desde un punto situado en el eje de simetría por encima de la embocadura, se trazan dos tangentes a la misma. La intersección de dichas tangentes con las trazadas desde P nos definen dos puntos en las proximidades de la embocadura que son los otros dos focos F_1 y F_2 .

Definidos así los tres focos P , F_1 y F_2 , se construyen tres elipses con focos P y F_1 , P y F_2 y F_1 y F_2 que producen dos elipses iguales y simétricas, y una tercera que alcanza el extremo superior de la caja donde sitúa un extremo de su eje menor.

Ahora vamos a haber cómo hay que escoger el punto desde el cual van a ser trazadas las dos tangentes que nos determina los focos F_1 y F_2 .

Dicho punto puede tener un recorrido desde A a B (fig. 10), por lo que vamos a ver lo que sucede.



ZONAS	1	2	3	4	5	6
Recorridos x L	0,25	0,5	2,	3,50	5,	6,
Grados	15	67	9	30	20	61
%	4,22	37,22	5,	52,	11,0	33,89

ELIPSES
2a1 = 0,471 L
2b1 = 0,356 L
2c1 = 0,441 L
2a = 0,512 L
2b = 0,405 L
2c = 0,515 L

Figura 10.

Al comenzar en A y trazar las tangentes, el recorrido de un rayo partiendo de P, ha de ser una zona por valor de 2 a y otra por valor de 2 a + 2 a1, siendo 2 a el eje mayor de las dos elipses iguales, y 2 a1, el eje mayor de la tercera.

Al ir descendiendo el punto para trazar las tangentes, la prolongación de las mismas deja entre ellas un espacio cuyo medio es A, y los recorridos además de ser tan simples como los anteriormente señalados, van aumentando al dar vueltas alrededor de la embocadura que, si n es el número de vueltas el recorrido máximo será n (2 a + 2 a + 2 a1) + 2 a, hasta alcanzar el círculo de la tarraja para salir al exterior.

El recorrido máximo en la guitarra clásica ya hemos visto que aproximadamente era de 5 L para que esta guitarra elíptica reúna el mismo tiempo de sostenido de las notas que en la gui-

tarra clásica, el recorrido máximo ha de ser igual, por lo que:

$$n(2a + 2a + 2a_1) + 2a = 5L$$

$$n = \frac{5L - 2a}{4a + 2a_1}$$

La distancia focal 2 c, por tener que estar los focos F1 y F2 en las tangentes a la tarraja desde P, puede variar de 0,14 L a 0,15 L, que son los puntos indicados F1 y F3, al trazar tangentes desde A y E que son los dos extremos. El valor del semieje mayor a1 es la distancia desde el punto F al punto A, pudiendo variar de 0,215 L a 0,235 L, por lo que 2 a ha de variar entre 0,43 L y 0,47 L.

Para las dos elipses iguales la distancia focal 2 c ha de variar de PF1 a PF3, o sea, de 0,31 L a 0,33 L, por lo que considerando el semieje menor b como aquel que para el mayor 2 c da el mayor ancho a la guitarra elíptica, semejante al de la guitarra clásica, el valor de b debe ser 0,27 L.

El mayor valor, por consiguiente, de a será:

$$\sqrt{0,27^2 + 0,165^2} = 0,32 L \text{ y el de } 2a, 0,64 L$$

El menor valor de 2 a debe ser un poco mayor que la distancia focal, pero lo suficiente para poder colocar el puente inferior, al tener por consecuencia un ancho en la guitarra elíptica que satisfaga esta condición, que como mínimo debe ser de 2 a = 0,4 L.

$$\text{Máximo } 2a = 0,64 L$$

$$\text{Mínimo } 2a = 0,40 L$$

Con ello podemos determinar los valores máximo y mínimo de n, considerando que el mayor valor de 2 a corresponde el menor de 2 a1, por lo que:

$$\text{Mínimo } n = \frac{5L - 2a}{4a + 2a_1} = \frac{4 - 0,64}{1,28 + 0,43} > 2$$

$$\text{Máximo } n = \frac{5 - 0,40}{0,8 + 0,47} < 4$$

Dado que n ha de ser un número entero, el único valor que sirve es n = 3.

Para este valor n = 3, resulta muy aproximadamente que las tangentes han sido trazadas desde el punto C, que es el medio desde el extremo de la caja A hasta la embocadura B. Este

punto se puede calcular matemáticamente, pero apenas va a diferir del señalado, y que para este estudio es más que suficiente, dada la pequeña variación que va a tener la situación de los focos que en el dibujo sería imposible de apreciar.

Así, para el punto C a $L/12$ de la embocadura del extremo superior de la caja, y para $n = 3$ los valores para construir las elipses son los que siguen, calculando con más exactitud:

$$\begin{aligned} 2a_1 &= 0,471 L & 2a &= 0,512 L \\ 2b_1 &= 0,450 L & 2b &= 0,405 L \\ 2c_1 &= 0,141 L & 2c &= 0,313 L \end{aligned}$$

que cumplen con la condición que el máximo recorrido es de $5L$, como en la guitarra clásica.

Así podemos dibujar los diversos recorridos de un rayo partiendo de P, y las zonas que ocupa, con la extensión en grados de cada una de ellas y el porcentaje que ocupan de acuerdo con la distribución que sigue (fig. 10):

Zona	Recorridos $L \times$	Grados	%
1	0,25	13	7,22
2	0,50	67	37,22
3	2	9	5
4	3,50	10	5,56
5	5	20	11,11
6	1	61	33,89

Así, dimensionada una guitarra elíptica, vemos que ésta contiene en perfecta igualdad con la guitarra clásica tres de los cuatro invariantes que la caracterizan, a saber:

1. Igualdad de condiciones para la longitud de la cuerda.
2. Igual distribución de armónicos.
3. Igual tiempo de sostenido de la nota.

La otra condición o invariante de la forma de sostener el sonido es diferente, para cuya comparación hemos representado las dos curvas que relacionan recorridos con los grados que abarca cada zona. Al tomar la escala $3/1.000$ para recorridos, que es la inversa de la velocidad del sonido, se convierten las abscisas en tiempos en que se tarda en hacer cada recorrido, que se relacionan con la cantidad de sonido que se produce en cada sector por los grados o extensión que ocupa.

Analizando las curvas de la figura 11, que relacionan tiempos con los grados de cada sec-

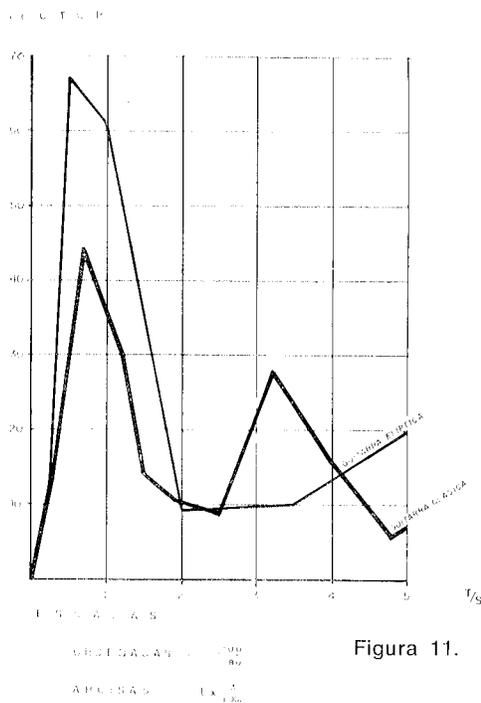


Figura 11.

tor, en realidad con la cantidad de sonido, se ve que la guitarra elíptica presenta solamente dos máximos, uno que da el mayor caudal al principio para bajar hasta los límites de la guitarra clásica y después subir con bastante suavidad para terminar.

Por el contrario, la guitarra clásica presenta tres máximos, uno al comenzar, casi de la misma manera que en la guitarra elíptica, para después de bajar presentar otro máximo, volver a descender y terminar levantando un poco el sonido.

A la vista de las dos curvas, es más uniforme el descenso de la cantidad de sonido en la guitarra elíptica, haciendo en una sola vez, a diferencia de la guitarra clásica lo hace en dos veces con más brusquedad, para terminar con menos cantidad de sonido.

Si integramos ambas curvas entre 0 y 5, es decir, hallamos su superficie, ésta nos va a indicar la suma de los productos de las cantidades de sonido en cada sector, por el tiempo que va a estar presente de acuerdo con su recorrido. Estas superficies, pues, van a representar la consistencia del sonido o brillo total del mismo que producen dichas guitarras.

Las superficies relativas obtenidas, sin tener en cuenta las escalas reales, puesto que para obtener valor absoluto en lugar de relativo hay

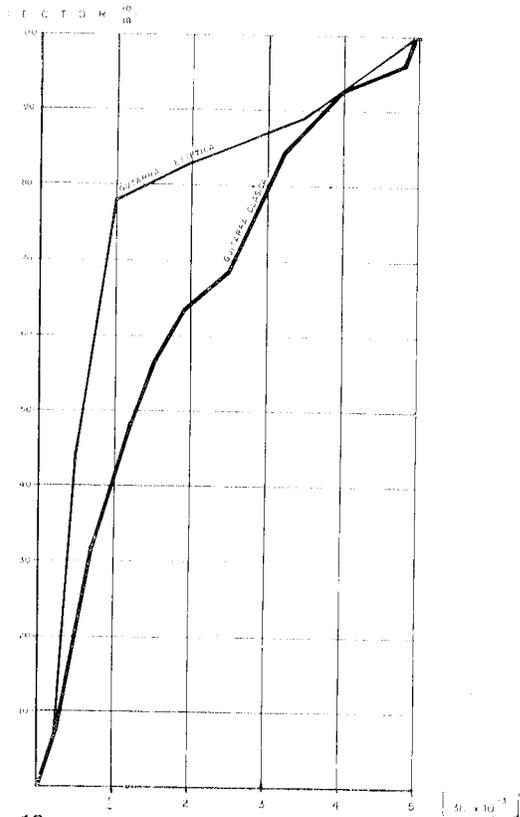


Figura 12.

que hacer solamente una multiplicación por valor constante, son las que siguen:

$$\text{Guitarra clásica } S_c = 92,465$$

$$\text{Guitarra elíptica } S_e = 115,375$$

Parece, pues, más brillante el sonido en la guitarra elíptica que en la clásica, en cifras próximas al 20 por 100.

Al representar las dos curvas de sostenimiento de la nota en ambas guitarras totalizando al origen las ordenadas, es decir, acumulando las partes alícuotas de la onda para terminar con el total de ella, que se ha sostenido durante el tiempo que corresponde al recorrido más largo, que hemos puesto como condición que sea igual en ambas guitarras, estas curvas difieren bastante, pareciendo el crecimiento hasta el final mucho más homogéneo, suave y continuado en la guitarra clásica, ya que la guitarra elíptica tiene dos partes bien continuadas y suaves, pero quebradas por un salto brusco para pasar de una nota a otra, resultando por ello más violento y, por consecuencia, menos agradable (figura 12).

Ahora bien, la curva de la guitarra elíptica está siempre por encima de la de la guitarra clásica para un mismo tiempo de sostenido de la nota, lo que nos indica que el sonido se produce siempre en mayor suma acumulada, y, por consiguiente, el tramo final es prácticamente igual en ambas guitarras, se desarrolla con más fuerza que en la guitarra clásica, con la única calificación negativa de no sostener con uniformidad esta diferencia, que termina por anularse en el último tramo a recorrer.

En la figura 13 se ha representado la caja de la guitarra elíptica con sus elipses completas, dibujando con trazo grueso el contorno que se va a utilizar. Sobre este contorno, y coincidiendo eje de simetría y embocadura, se ha superpuesto la planta de la caja de la guitarra clásica en trazo más fino.

Para acomodar la estética de la guitarra elíptica, a la que por costumbre se conoce, se podrían suavizar las curvas para obtener una planta parecida a la de la guitarra clásica, en cuyo interior quedase construido el perfil de la guitarra elíptica. Quedarían como es natural algunos espacios muertos, que servirían para mejor

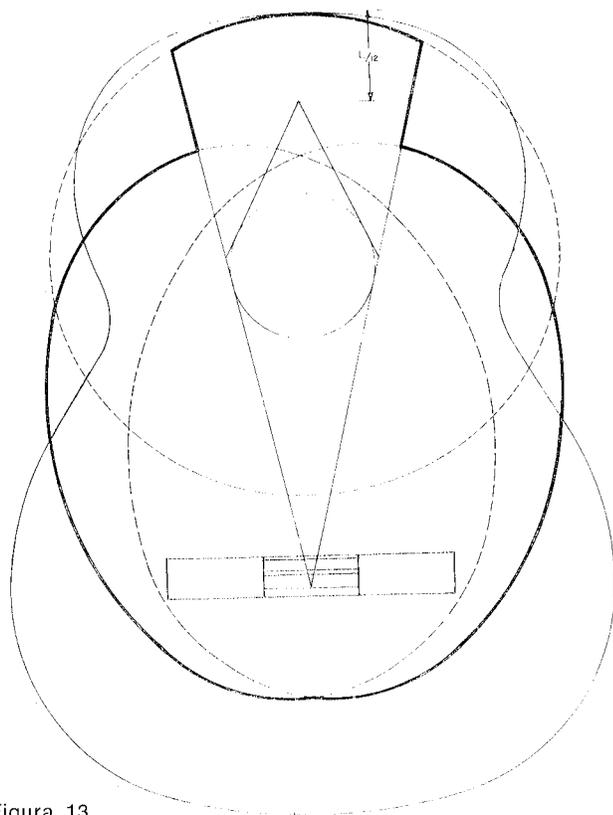


Figura 13.

sujeción de la tapa superior que va a vibrar (figura 14).

Finalmente, nos queda para definir totalmente esta guitarra, el abanico que debe llevar. Las mismas consideraciones que han servido para definirlo y establecerlo en la guitarra clásica pueden ser aquí aplicadas. Por ello, en la figura 15 está dibujado tal y como debía ser, en forma radial, que teóricamente, al parecer, es el que debe de ir mejor.

¿Qué resultados dará la guitarra elíptica descrita? ¿Qué condiciones va a presentar? Teóricamente bastante buenas, aunque para tener conciencia si es así, sería preciso el realizar un modelo y probarlo por manos expertas.

6. Dinámica en la guitarra.

Hasta ahora, por lo explicado, se conoce la constitución de la guitarra, sus sonidos, dimensiones posibles y forma para poderla construir adecuadamente; ahora vamos a comentar su dinámica, la manera de producir los mejores sonidos dentro del arte flamenco.

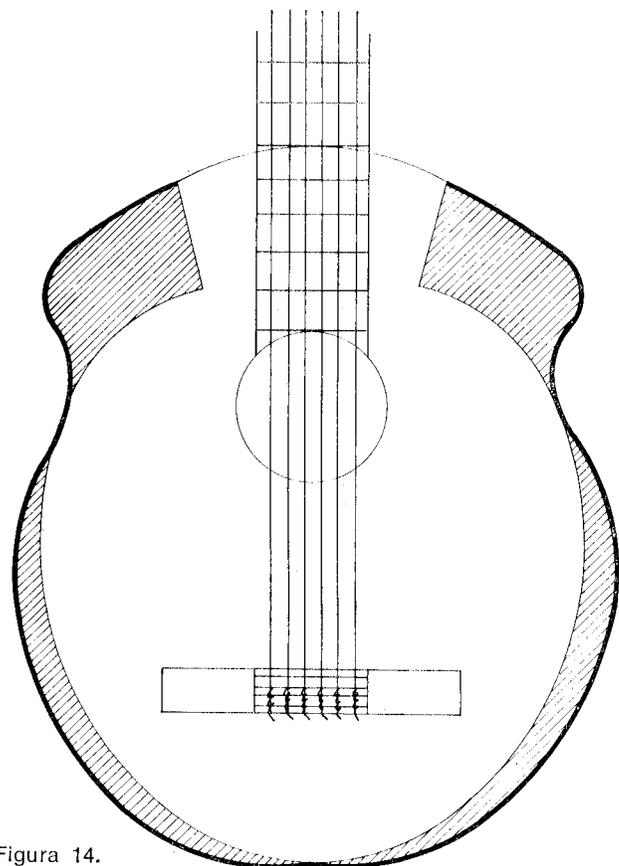


Figura 14.

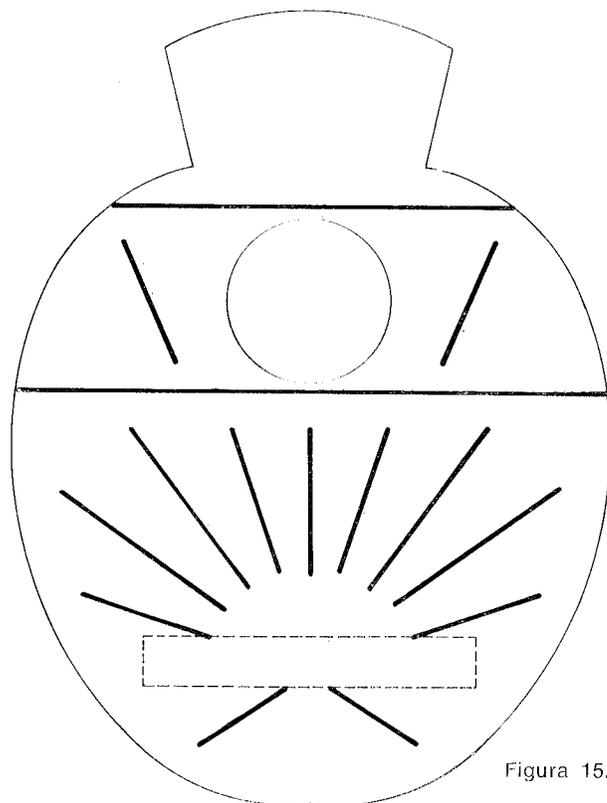


Figura 15.

En la ejecución del toque de la guitarra, el artista emplea las dos manos con técnicas completamente distintas. La izquierda solamente ejecuta con cuatro dedos, puesto que el quinto se emplea para producir el apoyo en el reverso del mástil.

La mano izquierda tiene dos funciones: una de ellas, es el fijar la cuerda en el traste correspondiente, para que se produzca el sonido necesario cuando se pulsa con la mano derecha; la otra, es el producir los ligados y acordes.

El acorde es la unión armónica de diferentes sonidos para determinadas posturas de la mano izquierda. El ligado consiste en tirar de una cuerda con un dedo o varios alternativamente, para producir notas que se sucedan tan rápidamente que den la sensación que están ligadas unas a otras, técnica que tiene una importancia singular en el buen guitarrista flamenco.

La mano derecha es la que ataca las cuerdas para producir vibración y sonido, resultando de la mayor importancia el punto o zona donde debe de atacarse. Debe hacerse en la parte comprendida entre el extremo inferior de la embocadura y el puente inferior, ya que en

ese pequeño espacio, suficiente para tocar, se encuentran situados los armónicos impares superiores acompañando a otros, que, al ser atacados por las manos del "tocaor", resulta que esos armónicos que tendrán los puntos de ataque por nudos no podrán producirse, lo que hace descartar una fuente de disonancia.

Respecto a la mano derecha, el más importante es el dedo pulgar, que, sin duda, es el más rápido de todos, y que puede dar lugar a producir efectos sorprendentes, bien empleando de arriba hacia abajo punteando varias cuerdas, y que para aprovechar su carrera también pulsa las cuerdas de abajo hacia arriba al volver, conociéndose dicho movimiento con el nombre de alzapúa.

Con el pulgar, la técnica flamenca más importante es el rasgueado, que consiste en el deslizamiento de todos los dedos sobre las cuerdas, produciendo un efecto de redoble.

El empleo del pulgar y el rasgueado tiene tal importancia, que hay guitarristas que solamente usando de esta simple técnica pueden producir un buen toque flamenco.

Ampliando su acción en el toque, la mano derecha produce otras técnicas mejores, que van completando la buena ejecución. Se trata del picado, el arpegio y el trémolo. El picado consiste en tocar una cuerda alternativamente con dos dedos cualesquiera, que cuando está bien ejecutado y con rapidez es de gran efecto. El arpegio se forma al tiempo que el pulgar pulsa un bordón, y dos o tres dedos atacan alternativamente las cuerdas altas, produciendo, según la forma que se haga, arpegios delanteros, invertidos, circulares y combinados. Finalmente, el trémolo, cuya técnica consiste en la pulsación de una cuerda baja con el pulgar, al tiempo que con dos, tres o cuatro dedos se ataca simultáneamente una cuerda alta, produciendo así el trémolo de tres, cuatro o cinco sonidos, de acuerdo con el número de dedos empleado.

Finalmente, nos queda el definir las falsetas que tanto se emplean en el flamenco en el toque de guitarra, que, en definitiva, son variaciones improvisadas equivalentes al melisma o floreos en el canto que produce sucesiones melódicas, la mayoría de las veces sin valor flamenco, por ser muy difícil el hacer estas variaciones legítimas bien entroncadas en el compás, produciendo cuadratura en la ejecución.

Lo más importante de todo el toque, para producir un buen flamenco mejor si es con el empleo de todas las técnicas señaladas, es el dominio del compás. El que ejecuta con mucha técnica y poco compás queda suspendido en flamenco. El compás es una condición indispensable para la expresión del flamenco.

Hay artistas que tienen un sentido nato del compás, que sin esfuerzo ni atención y por intuición simplemente, tocan siempre a compás incluyendo sus falsetas probablemente sin darse cuenta. Es el caso de los grandes maestros, que por lo general, no saben música, aprenden de oído y varían a su aire e instintivamente las falsetas que han aprendido, siendo mucho más completos y flamencos que aquellos tocaores que trataron de mejorar adquiriendo conocimientos de música.

Aunque muchas veces la guitarra se emplea para concierto flamenco, su principal función es para acompañamiento en el canto y baile, técnica difícil, ya que el que ejecuta un buen acompañamiento tiene que conocer extensamente todos los cantos y bailes, como si fueran a ser ejecutados por él mismo, y tener la intuición que permita anticiparse al cantaor o bailaor para hacerle entrar bien en el compás. Debe lucirse en el preludio para dar entrada al cantaor, pero después debe de resultar melodioso para pasar inadvertido y no taparle, y estar muy atento para que en tercio final cuando el canto llega al esfuerzo de cierre que ahoga, arropar con fuerte rasgueo al cantaor calculando con exactitud el límite de fuerzas del mismo que es el momento exacto de taparle totalmente con un fuerte toque.

Para finalizar diremos que la guitarra con sólo seis cuerdas, seis clavijas, un mango o mástil con su tableta diapasón de 18 trastes y una ligera caja armónica, tiene tales recursos de calidad en su sonido, timbre y expresión que es muy difícil de lograr con otro instrumento. Las cuerdas apretadas por los dedos de un tocaor, pueden transmitir con la mayor eficacia, el impulso de su inspiración, expresando de forma definitiva su alegría, tristeza, amor, tragedia, valor y triunfo. Con el empleo de la guitarra y sus sonidos suaves, un tocaor puede expresar toda la gama de sentimientos que caben en el corazón humano.